



Diseño y Validación de un Modelo de Planeación y Programación de la Producción basado en Sistemas Multiproducto – Multiempaque

María Amalia Júbiz Díaz

**Universidad del Norte
Departamento de Ingeniería Industrial, División de Ingenierías
Barranquilla, Colombia
2016**

Diseño y Validación de un Modelo de Planeación y Programación de la Producción basado en Sistemas Multiproducto – Multiempaque

María Amalia Júbiz Díaz

**Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título
de:**

Magister en Ingeniería Industrial

Director:

Alcides R. Santander Mercado Ph.D.

Línea de Investigación:

Gestión de Operaciones

Grupo de Investigación:

Productividad y Competitividad

Universidad del Norte

Departamento de Ingeniería Industrial, División de Ingenierías

Barranquilla, Colombia

2016

Aprobado por el profesorado de la División de Ingenierías en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar el título de Magister en Ingeniería Industrial

Ing. Alcides R. Santander Mercado

Firma del Director

Ing. Rodrigo A. Barbosa Correa

Corrector del Proyecto

Ing. Gina M. Galindo Pacheco

Corrector del Proyecto

Barranquilla, Abril 29, 2016

Contenido

	<u>Pág.</u>
Lista de figuras.....	IX
Lista de tablas	XI
1. Introducción	1
1.1 Planteamiento del Problema de Investigación	1
1.2 Justificación.....	3
1.2.1 Teórica	3
1.2.2 Práctica	4
1.3 Objetivos	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
1.4 Metodología Propuesta	6
2. Estado del Arte	9
2.1 Problema de Programación del Lote Económico (ELSP).....	9
2.1.1 Metodologías para resolver ELSP en problema de una sola máquina	10
2.1.2 Metodologías para resolver ELSP en problemas de múltiples máquinas	15
2.1.3 Desarrollo del estado del arte de ELSP	20
2.2 Tamaño de Lote de Empaque	25
3. Estrategia de Solución para la Planeación y Programación de la Producción basado en Sistemas Multiproducto–Multiempaque.....	29
3.1 Descripción del Problema y Estrategia de Solución.....	29
3.2 Formulación Matemática	32
3.2.1 Unidad de Empaque para Minimizar Costo de Unidades Perdidas (Modelo 1).....	34
3.2.2 Unidad de Empaque para Minimizar Costo de Desembalaje (Modelo 2)	41
3.3 Algoritmo Genético Híbrido (AGH)	44
3.3.1 Etapa I: Tamaños de Empaque	46
3.3.2 Etapa II: Programación de Producción.....	49
4. Resultados de la Estrategia de Solución para la Planeación y Programación de la Producción basado en Sistemas Multiproducto–Multiempaque	59
4.1 Resultados Computacionales del AGH.....	59
4.1.1 Resultados del AGH – Modelo 1	62
4.1.2 Resultados del AGH – Modelo 2.....	65
4.2 Comparación de Estrategias de Empaque	68

5. Conclusiones.....	74
A. Anexo: Función objetivo y características en investigaciones de ELSP en una sola máquina	77
B. Anexo: Investigaciones de ELSP en máquinas en paralelo	83
C. Anexo: Investigaciones de ELSP en líneas de producción continuas	84
D. Anexo: Investigaciones de ELSP en líneas de producción continuas flexibles	85
Bibliografía	87

Lista de figuras

Pág.

Figura 2-1:	Clasificación de publicaciones con base en el entorno de producción ...	21
Figura 2-2:	Clasificación de publicaciones con base en la función objetivo.....	22
Figura 2-3:	Clasificación de publicaciones con base en el tipo de función objetivo ..	22
Figura 2-4:	Proporción de publicaciones con base en el método de solución para ELSP en una sola máquina	23
Figura 2-5:	Proporción de publicaciones con base en el método de solución para ELSP en múltiples máquinas.....	24
Figura 3-1:	Esquema del sistema producción/empaque.....	30
Figura 3-2:	División de unidades de uso para construir empaques	31
Figura 3-3:	Esquema de estrategia de solución para la planeación y programación del sistema producción/empaque	31
Figura 3-4:	Curva de potencia eléctrica en función del tiempo	37
Figura 3-5:	Tamaños de empaque para diferentes pedidos y referencias	46
Figura 3-6:	Cálculo de tamaños de sub-lotes y asignación de tiempos de entrega con base en pedidos desconsolidados para una referencia	47
Figura 3-7:	Cálculo de tamaños de sub-lotes con base en pedidos desconsolidados para una referencia	48
Figura 3-8:	Ejemplo de cromosoma de programa de producción	50
Figura 3-9:	Ejemplo de cromosoma de programa de producción	52
Figura 3-10:	Asignación aleatoria de unidades de uso a recursos de la primera estación	52
Figura 3-11:	Operador de cruzamiento de preservación de subprogramas.....	57
Figura 3-12:	Operador de mutación de inversión	57
Figura 4-1:	DMI para Modelo 1	63
Figura 4-2:	NPS para Modelo 1	63
Figura 4-3:	DMI para Modelo 2	65
Figura 4-4:	NPS para Modelo 2	66
Figura 4-5:	Frontera de Pareto de una corrida de 5 referencias para Tiempo 1 – Modelos 1 y 2	68
Figura 4-6:	Frontera de Pareto de una corrida de 5 referencias para Tiempo 2 – Modelos 1 y 2	68
Figura 4-7:	Frontera de Pareto de una corrida de 5 referencias para Tiempo 3 – Modelos 1 y 2	69

- Figura 4-8:** Frontera de Pareto de una corrida de 5 referencias para Tiempo 4 – Modelos 1 y 2 69
- Figura 4-9:** Frontera de Pareto de una corrida de 5 referencias para Tiempo 5 – Modelos 1 y 2 69
- Figura 4-10:** Frontera de Pareto de una corrida de 5 referencias para Tiempo 6 – Modelos 1 y 2 70
- Figura 4-11:** Frontera de Pareto de una corrida de 10 referencias para Tiempo 1 – Modelos 1 y 2 71
- Figura 4-12:** Frontera de Pareto de una corrida de 10 referencias para Tiempo 2 – Modelos 1 y 2 71
- Figura 4-13:** Frontera de Pareto de una corrida de 10 referencias para Tiempo 3 – Modelos 1 y 2 71
- Figura 4-14:** Frontera de Pareto de una corrida de 10 referencias para Tiempo 4 – Modelos 1 y 2 72
- Figura 4-15:** Frontera de Pareto de una corrida de 10 referencias para Tiempo 5 – Modelos 1 y 2 72
- Figura 4-16:** Frontera de Pareto de una corrida de 10 referencias para Tiempo 6 – Modelos 1 y 2 72

Lista de tablas

	<u>Pág.</u>
Tabla 2-1: Métodos de solución para ELSP en problemas de una sola máquina	10
Tabla 2-2: Métodos de solución para ELSP en problemas de múltiples máquinas	15
Tabla 4-1: Estructura de problemas de prueba	60
Tabla 4-2: Distribuciones para generación de instancias experimentales.....	60
Tabla 4-3: Valores de parámetros para pruebas experimentales	60
Tabla 4-4: Tiempo CPU y Número de Empaques – Problemas de 5 Referencias – Modelo 1	64
Tabla 4-5: Tiempo CPU y Número de Empaques – Problemas de 10 Referencias – Modelo 1	64
Tabla 4-6: Tiempo CPU y Número de Empaques – Problemas de 5 Referencias – Modelo 2	67
Tabla 4-7: Tiempo CPU y Número de Empaques – Problemas de 10 Referencias – Modelo 2	67
Tabla 4-8: Métricas de Desempeño NSP y DMI – Problema de 5 Referencias	70
Tabla 4-9: Métricas de Desempeño NSP y DMI – Problema de 10 Referencias	73

1.Introducción

1.1 Planteamiento del Problema de Investigación

Los productos colombianos han perdido competitividad frente a mercados internacionales especialmente por el sobre costo energético. El costo medio de electricidad para las empresas en Colombia es hasta un 51% más elevado que en Estados Unidos (Programa de Transformación Productiva, 2013). Debido a la aplicación de la Ley 1430 del 2010, el costo de energía disminuyó aproximadamente unos US\$7.8 centavos/kWh, sin embargo, aún supera la tarifa que actualmente se cobra en otros países de Latinoamérica.

Por otro lado, el impacto ambiental por el constante funcionamiento de los sistemas de producción se ha convertido en un tema que concierne a todos los sectores económicos de la región. Las emisiones de dióxido de carbono pueden alcanzar hasta los 0,278 kg CO₂ por cada kWh de energía eléctrica consumida por la maquinaria (Generalitat Valenciana, 2009), lo que justifica la necesidad de implementar estrategias de planeación con el fin de reducir la utilización excesiva de energía por una gestión ineficiente de recursos.

Uno de los factores de mayor incidencia en los dos problemas mencionados anteriormente es la programación de la producción de múltiples referencias. Al momento de pasar de la fabricación de una referencia a otra, es necesario realizar una preparación de recursos por los diferentes diseños, requerimientos de material y especificaciones de cada tipo de producto. Esto implica detener los procesos, apagar los equipos para realizar cambios en su configuración y arrancar nuevamente. Por lo tanto, es preferible no realizar estos alistamientos ya

que el costo y utilización de la energía se potencian cuando se tiene un gran número de familias diferentes.

Una medida que se ha optado para reducir los costos de preparación y ajuste de la maquinaria es la producción por lotes. Normalmente en los sistemas *push* se trabaja con unos tamaños de lote de producción mayores que en los sistemas *pull*. En los sistemas *push* se busca minimizar el costo de dejar de fabricar una referencia y pasar a la producción de otra, por lo tanto, se mantiene inventario de producto terminado como medida de protección ante los cambios del mercado. En los sistemas *pull* se prefiere realizar un mayor número de alistamientos para responder rápidamente a la variabilidad de la demanda, es decir, se incurre en altos costos de preparación de equipos incluyendo el costo energético por el arranque de la maquinaria. En el caso de los sistemas híbridos, algunos productos se fabrican bajo pedido y otros para inventario (Crespo Franco & García Vázquez, 1996). Sin embargo, la implementación de estos esquemas tiene sus efectos en la etapa de empaque de producto terminado.

En los programas de producción hay incertidumbre sobre la cantidad que se debe fabricar de cada referencia para no incurrir en altos costos de inventario o en ciclos de fabricación extras para completar los lotes de venta. Generalmente las empresas manejan una unidad de empaque fija por referencia, es decir, no existen estrategias de estandarización o de flexibilidad para determinar el tamaño de lote de venta con el cual se debe hacer frente a los cambios en los requerimientos del mercado. En ciertas ocasiones se vende más de lo solicitado por el cliente porque resulta más económico o se ajusta el lote de venta para entregarle exactamente lo que desea comprar. Como resultado, los empaques sufren averías, se incurre en sobrecostos por embalajes y se generan desechos de material.

El empaque tiene un impacto ambiental que no es sostenible en el largo plazo debido a las emisiones de aire por su fabricación, transporte, uso y disposición

final (Zailani, Jeyaraman, Vengadasan, & Premkumar, 2012). Si las empresas manejan empaques más livianos, menor es la utilización de energía en el transporte de productos y se facilita la implementación de estrategias de logística inversa para la reutilización del material de los embalajes.

Por lo tanto, surge la siguiente pregunta problema: ¿Cómo mediante el diseño de estrategias robustas se puede programar las operaciones de producción y determinar los tamaños de empaque de producto terminado, minimizando los costos asociados a alistamientos, inventario e impacto por utilización de energía?

1.2 Justificación

1.2.1 Teórica

El problema de *lot sizing y scheduling* se ha investigado desde 1958 (Narro Lopez & Kingsman, 1991). Drexler y Kimms (1997) lo definen como un problema de planeación de producción a corto plazo en donde se busca un balance entre los costos de alistamiento y de mantenimiento de inventario. Inicialmente se formuló para entornos de producción compuestos por una sola máquina. Hsu (1983) demostró que el problema es *NP-hard* ya que requiere satisfacer restricciones de capacidad de producción. Gallego y Xiao Shaw (1997) afirmaron que la complejidad del problema se debe a la restricción de sincronización en la producción, es decir, no se puede programar la fabricación de dos tipos de referencias en una máquina al mismo tiempo. Además, la función objetivo de la versión general del problema es no convexa, lo que hace difícil resolverla de forma óptima (Bourland & Yano, 1997).

La complejidad del problema crece a medida que aumenta el número de máquinas. En el caso de *parallel machines*, se debe determinar el tamaño de lote por referencia, la secuencia de producción y qué ítems se van fabricar en cada uno de los recursos del sistema (Bollapragada & Rao, 1999). En las últimas décadas, los problemas de *scheduling* en *flow shops* y *job shops* han sido

investigados por su presencia en entornos industriales. Garey et al (1976) demostraron que la complejidad de estos problemas es *NP-complete*, es decir, pertenecen a la familia de problemas más difíciles de resolver por su naturaleza combinatoria (González Fernández, 2011).

A pesar del interés por resolver el problema de programación de operaciones en entornos de producción más complejos, la mayoría de las investigaciones que consideran el *lot sizing* en *scheduling* se han concentrado en seguir desarrollando metodologías para solucionar el problema aplicado a una sola máquina. Ouenniche, Boctor, Huang y Yao son los autores que han explorado el problema en *flow shops* y *job shops* con mayor exhaustividad, proponiendo heurísticas diferentes para la misma versión del problema.

Sin embargo, actualmente en la industria existen entornos de producción con características que aún no se han incluido en el desarrollo de las investigaciones. Por lo tanto, es evidente la necesidad de diseñar una estrategia genérica y robusta que integre la programación de sistemas de producción y la etapa de empaque de múltiples referencias que garantice buenas soluciones en un tiempo razonable y aplicable a problemas de mayor tamaño. Además, se espera que esta investigación sea transferible a cualquier tipo de industria u otra área de aplicación.

1.2.2 Práctica

La programación de producción es un factor importante en el desarrollo de diversos sectores de la región ya que implica la gestión de los recursos con los cuales se satisface las necesidades del mercado. El costo para suplir sus requerimientos ha aumentado por la multiplicidad de referencias que las empresas ofrecen con el propósito de mantener un alto nivel de servicio. Sin embargo, en las empresas no se tiene conciencia de las implicaciones de estas estrategias en el desempeño de los sistemas productivos. Por ser un problema de alta complejidad, la programación de la producción con base en el conocimiento

tácito conlleva a cometer errores en la secuenciación de referencias a fabricar, asignación de recursos y tamaños de lote de producción. Como resultado se realizan alistamientos innecesarios, lo que implica apagar y encender los equipos con mayor frecuencia. Esto se refleja en una baja eficiencia energética en los procesos, altos costos y efectos ambientales no sostenibles a largo plazo.

Las consecuencias de estas deficiencias tienen un fuerte impacto en la etapa de empaque. Como no existe una sincronización entre la cantidad a fabricar por referencia y lo que se empaqueta en el lote de venta, las empresas incurren en altos costos de inventario de producto terminado, mala utilización del espacio para almacenamiento, inventario de materia prima para empaques y sobrecostos de alistamiento y producción. Por lo tanto, surge la necesidad de determinar estrategias de estandarización o flexibilidad en los tamaños de lote de producción y venta de acuerdo a los requerimientos de la demanda.

Con esta investigación se espera mejorar el desempeño de los sistemas de producción mediante una tecnología de soporte a las decisiones de programación de las operaciones al mínimo costo considerando la etapa de empaque de producto terminado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar y validar un modelo para la planeación y programación de sistemas de producción multi-producto basado en unidades de empaque variable minimizando los efectos sobre la producción, inventario, alistamiento y utilización de energía.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar las brechas en las estrategias de solución implementadas al Problema de Programación del Lote Económico.
- Diseñar métricas que permitan cuantificar los efectos sobre la producción, inventario, alistamiento y utilización de energía.
- Determinar las características y restricciones del entorno de producción al cual se le implementará la solución propuesta.
- Determinar el método de solución al modelo diseñado con base en su complejidad.
- Validar el modelo/herramienta mediante la evaluación de desempeño en función de tiempo de ejecución y comparación de soluciones halladas por otros métodos implementados.
- Realizar ajustes al diseño de la herramienta/modelo para aumentar su robustez y eficiencia.

1.4 Metodología Propuesta

- **Fase 1 – Definición de Características del Modelo Propuesto:** Inicialmente se hará una revisión del estado del arte del Problema de Programación del Lote Económico identificando el entorno de producción, los objetivos trazados, las restricciones del problema y el método de solución aplicado con el fin de determinar brechas en las propuestas publicadas en la literatura científica hasta la fecha. Con base en esto, se determinará las características para el diseño del modelo producto de esta investigación.
- **Fase 2 – Diseño del Modelo y Método de Solución del Problema de Programación del Lote Económico:** En esta fase se realizará el diseño del modelo con base en los aspectos determinados en la fase anterior, así como el método de solución. Para su validación, se realizará un caso de estudio con base en un sistema compuesto por una estación de laminado en frío, una estación de corte y una estación de empaque, en donde la segunda estación

corresponde a un *flexible flow shop*. Se trabajará con valores simulados de demanda estocástica, la cual será modelada bajo una distribución discreta.

- **Fase 3 – Ajustes al Diseño del Modelo:** Por último, con base en los resultados obtenidos en la fase anterior, se realizarán los ajustes al modelo diseñado con el fin de mejorar la calidad de las soluciones obtenidas.

2.Estado del Arte

En este capítulo se presenta la revisión de literatura de dos problemas relacionados con esta investigación: Problema de Programación del Lote Económico (ELSP) y Tamaño de Empaque. La sección 2.1 se concentra en la revisión literaria del primer tópico mencionado. En ella se presenta la metodología seguida para la construcción del estado del arte, las propuestas de solución desarrolladas por diferentes investigadores para entornos de producción de una y múltiples máquinas y finalmente, un análisis de los resultados hallados para identificar las brechas en el desarrollo del estado del arte. La sección 2.2 presenta las metodologías que se han desarrollado para la definición de tamaños de empaque.

2.1 Problema de Programación del Lote Económico (ELSP)

La primera revisión literaria del Problema de Programación del Lote Económico fue la publicada por Salah Elmaghraby (1978), el cual lo definió como el problema de acomodar patrones de producción cíclicos cuando varios productos son fabricados en una misma instalación. Este autor concluyó que los estudios que se habían realizado hasta ese entonces se habían enfocado en desarrollar metodologías que alcanzan una solución óptima de una versión restringida del problema original. Sin embargo, su complejidad no permitió que se realizaran muchos avances en esta línea de investigación, sino que se emplearan enfoques heurísticos para encontrar soluciones cercanas a los mejores valores encontrados en la literatura hasta ese entonces, diversificando la versión original del problema.

Esta revisión literaria se basa en el trabajo realizado por Santander–Mercado y Jubiz–Díaz (2016). En este artículo, los autores proponen una clasificación taxonómica para organizar sistemáticamente todas las investigaciones que se han desarrollado del ELSP desde Rogers (1958). Esta es la primera revisión de literatura que proporciona un análisis del ELSP basado en el entorno de producción y en el método de solución seguido por los investigadores. En este trabajo se presentan 126 artículos relacionados con propuestas de solución de ELSP considerando los diferentes sistemas de producción. Por lo tanto, el propósito de este capítulo es proporcionar una descripción de la literatura sobre este tema y presentar un simple análisis para identificar áreas no exploradas en relación a los enfoques que se han adoptado para solucionar ELSP.

2.1.1 Metodologías para resolver ELSP en problema de una sola máquina

Dada la complejidad de ELSP, las investigaciones en entornos de una sola máquina están divididas en dos extremos: versiones simples con relajaciones y versiones complicadas con diversidad consideraciones. El primer extremo se ha resuelto por medio de programación matemática tradicional y métodos exactos, mientras que el segundo se ha abordado a través de enfoques aproximados. Estos últimos han sido la opción más utilizada por muchos investigadores en este tema (Kai Chan, Ho Chung, & Lim, 2013). En la Tabla 2-1 se presentan las metodologías que se han empleado para resolver ELSP en entornos de producción compuestos por una sola máquina.

Tabla 2-1: Métodos de solución para ELSP en problemas de una sola máquina

Tipo de Método	Referencias
Exacto	Krone (1964), Maxwell (1964), Bomberger (1966), Madigan (1968), Elmaghraby, Mallik y Nuttle (1970), Hodgson (1970), Goyal (1973), Fujita (1978), Haessler (1979), Park y Yun (1984), Hodgson y Nuttle (1986), Gallego y Roundy (1988), Lee y Danusaputro (1989), Gallego y Joneja (1994), Elhafi y Bai (1997), Grznar y Riggles (1997), Ben-Daya y Hariga (2000), Khoury, Abboud, y Tannous (2001), Alle, Pinto, y Papageorgiou (2004), Faaland, Schmitt, y Arreola–Risa (2004), Tang y Teunter (2006), Teunter, Kaparis, y Tang (2008)
Heurística	Stankard y Gupta (1969), Doll y Whybark (1973), Haessler y Hogue (1976), Delporte y

Tipo de Método	Referencias
	Thomas (1977), Dobson (1987), Boctor (1988), Geng y Vickson (1988), Larrañeta y Onieva (1988), Philipoom, Rees, y Taylor (1989), Kuo y Inman (1990), Dobson (1992), Davis (1995), Don Taylor, Taha, y Chowning (1997), Khouja (1997), Moon y Christy (1998), Moon, Hahm, y Lee (1998), Segerstedt (1999), Oh y Karimi (2001), Yao (2001), Yao y Elmaghraby (2001), Moon, Giri, y Choi (2002), Wagner y Davis (2002), Giri, Moon, y Yun (2003), Cooke, Rohleder, y Silver (2004), Giri y Moon (2004a), Giri y Moon (2004b), Soman, Van Donk, y Gaalman (2004), Yao (2005), Moon, Cha, y Bae (2006), Levén y Segerstedt (2007), Liu, Wu, y Zhou (2008), Salvietti y Smith (2008), Brander y Segerstedt (2009), Qiu y Chang (2009), Teunter, Tang, y Kaparis (2009), Luo (2010), Sun, Huang, y Jaruphongsa (2010), Chang, Chen, y Hsu (2011), Chang y Yao (2011), Shirodkar, Sridharan, y Pillai (2011), Vidal-Carreras, Garcia-Sabater, y Coronado-Hernandez (2012), Zaroni et al. (2012), Adelman y Barz (2013), Holmbom, Segerstedt, y van der Sluis (2013)
Metaheurística	Khougha, Michalewicz, y Wilmot (1998), Moon, Silver y Choi (2002), Sarker y Newton (2002), Raza y Akgunduz (2005), Chang et al. (2006), Raza, Akgunduz, y Chen (2006), Chandrasekaran et al. (2007), Chatfield (2007), Peixin y Gujje (2008), Chang y Yao (2009), Rao, Subbaiah, y Raju (2009), Sun, Huang, y Jaruphongsa (2009a), Chan y Chung (2010), Gonçalves y Sousa (2011), Hernández, Hernández, y Flores (2011), Kayvanfar, Zandieh, y Mahdavi (2011), Tasgetiren, Bulut, y Fadiloglu (2011), Tasgetiren, Bulut y Fadiloglu (2011), Bulut, Tasgetiren, y Fadiloglu (2012), Chung y Chan (2012), Tasgetiren, Bulut, y Fadiloglu (2012), Bulut y Tasgetiren (2014a), Bulut y Tasgetiren (2014b), Capa, Akgunduz, y Demirli (2014), Luo et al. (2014), Mohammadi, Musa, y Bahreininejad (2014), Chang, Chen, y Wong (2015), Mohammadi, Musa, y Bahreininejad (2015)
Híbridos	Gonçalves y Leachman (1998), Yao y Huang (2005), Moon, Cha, y Bae (2006), Mokhlesian, Fatemi Ghomi, y Jolai (2010), Kayvanfar y Zandieh (2012), Peixin (2012), Adil et al. (2013), Ganguly et al. (2013), HasanAdil et al. (2013), Adelman y Barz (2014)

▪ Métodos exactos para ELSP en una sola máquina

La programación matemática fue aplicada por muchos autores para solucionar una versión restringida del problema bajo enfoques de programación cíclicos. Bomberger (1966) desarrolló un enfoque de programación dinámica basado en el enfoque de periodo básico. Madigan (1968) analizó las desventajas de la propuesta de Bomberger y presentó un método fácil para resolver ELSP con un horizonte de planeación infinito. Fujita (1978) aplicó análisis marginal para la reducción de la búsqueda de soluciones a un simple cálculo sistemático y verificación de factibilidad. Park y Yun (1984) propusieron un algoritmo enumerativo basado en simples pruebas de factibilidad de programas de producción.

Hodgson y Nuttle (1986) desarrollaron un modelo de programación lineal en donde se evidencia que el costo de inventario puede ser expresado como una

función lineal y el ciclo de producción se puede determinar vía optimización. Lee y Danusaputro (1989) propusieron un algoritmo que permite tiempos de ciclos diferentes para los productos que se fabrican con mayor frecuencia. Faaland, Schmitt y Arreola-Risa (2004) desarrollaron un algoritmo considerando ventas perdidas.

▪ **Heurísticas y metaheurísticas para ELSP en una sola máquina**

Como se mencionó anteriormente, existe un gran número de estudios que emplean enfoques heurísticos para encontrar soluciones cercanas al óptimo por la complejidad de este problema. Stankard y Gupta (1969), Hodgson (1970), Doll y Whybark (1973) y Haessler y Hogue (1976) desarrollaron heurísticas aplicadas al problema expuesto por Bomberger en 1966, las cuales entregaron mejores resultados. Dobson (1987) propuso una heurística para encontrar buenas soluciones factibles basado en el enfoque de tamaño de lote variable.

Moon, Hahm y Lee (1998), Moon, Giri y Chol (2002) y Giri, Moon y Yun (2003) publicaron varias heurísticas para resolver este problema considerando el enfoque de tamaño de lote variable basado en la heurística de Dobson (1987). Giri y Moon (2004a) presentaron una heurística modificada de la propuesta de Dobson para hallar programas de producción. Liu, Wu y Zhou (2008) desarrollaron una heurística en donde el método de redondeo para determinar los ciclos de producción se diferencia de las demás publicaciones. Los resultados obtenidos son mejores comparados con el enfoque de periodo básico tradicional y la heurística de Dobson.

Luo (2010) propuso una heurística en el que ELSP es tomado como dos problemas independientes: (1) secuencia de producción y (2) secuencia de tiempo de producción, secuencia de tiempo de inactividad y el tiempo de ciclo. Shirodkar, Sridharan y Pillai (2011) publicaron una heurística para abordar este problema basado en el enfoque de tamaño de lote variable, considerando grupos de trabajos. Estos autores evaluaron su eficacia con un gran conjunto de

problemas aleatorios y llegaron a la conclusión de que su heurística supera a los estudios anteriores como Kuo e Inman (1990) y Moon et al. (2006).

Las metaheurísticas también han sido una buena elección en varios estudios para obtener soluciones a ELSP en una sola máquina debido a su éxito en muchos problemas de optimización combinatoria. Moon, Silver y Choi (2002) fueron los primeros autores en combinar el enfoque de tamaño de lote variable con algoritmos genéticos. Raza y Akgunduz (2005) y Raza, Akgunduz y Chen (2006) propusieron algoritmos de búsqueda tabú y recocido simulado, y llevaron a cabo un experimento factorial general para investigar el efecto de la variación de parámetros de estos métodos. El estudio mostró que estas dos metaheurísticas superan a la heurística de Dobson y a los algoritmos genéticos híbridos.

Chang et al. (2006) y Rao, Subbaiah y Raju (2009) aplicaron algoritmos genéticos para resolver ELSP con demandas difusas. Chandrasekaran et al. (2007) propusieron algoritmos genéticos, recocido simulados y colonia de hormigas. El rendimiento computacional de los algoritmos propuestos reveló su superioridad entre los estudios anteriores en cuanto a soluciones de calidad. Chan y Chung (2010) adoptaron un algoritmo genético para determinar la secuencia de la producción, ya sea con el enfoque del entero más próximo o la política de potencias de dos. Hernández, Hernández y Flores (2011) aplicaron recocido simulado para resolver el problema clásico ejemplo de Bomberger bajo enfoque de BP.

Tasgetiren, Bulut y Fadiloglu (2011) y Bulut y Tasgetiren (2014a) aplicaron un algoritmo artificial discreto de colonia de abejas con una representación solución multi-cromosoma. Chung y Chan (2012) propusieron un algoritmo genéticos de dos niveles en el que, a diferencia de estudios anteriores, las frecuencias y longitudes de producción se pueden determinar al mismo tiempo con el algoritmo genético. Mohammadi, Musa y Bahreininejad (2014; 2015) abordan ELSP con consideraciones de vida útil de trabajos vida utilizando cuatro algoritmos

metaheurísticas calibrados conocidos, a saber, algoritmos genéticos, recocido simulado, enjambre de partículas y colonia de abejas.

▪ **Métodos híbridos para ELSP en una sola máquina**

Debido a la complejidad de ELSP incluso en un entorno de instalación única, algunos autores han abordado este problema a través de una combinación de técnicas computacionales. Tradicionalmente, muchos investigadores han utilizado un único método para resolver este problema. Por lo tanto, varios estudios han argumentado que mejores resultados pueden ser obtenidos a través de la hibridación de metodologías en lugar del enfoque algoritmo único.

Uno de los enfoques comunes son los algoritmos genéticos híbridos con técnicas de búsqueda local. Yao y Huang (2005) abordaron ELSP con productos en deterioro utilizando algoritmos genéticos con la heurística de búsqueda Proc FT binaria para generar soluciones factibles con el valor objetivo mínimo. Moon, Cha y Bae (2006) combinaron su heurística propuesta con algoritmos genéticos para resolver ELSP con grupos de trabajo. Estudios computacionales demostraron que el algoritmo genético híbrido supera a la heurística de Kuo y Inman (1990). Mokhlesian, Fatemi Ghomi y Jolai (2010) desarrollaron un algoritmo híbrido con búsqueda por vecindad a fin de evitar óptimos locales.

Por otro lado, Peixin (2012) investigó un algoritmo de optimización híbrido que combina la meta heurística enjambre de partículas y algoritmos de búsqueda local basados en gradientes. Este autor llegó a la conclusión de que la combinación propuesta es mejor que el enjambre de partículas estándar con respecto a la eficiencia de la solución. Adil et al. (2013) sugirieron la hibridación del método de búsqueda de sección dorada con recocido simulado, enjambre de partículas y búsqueda cuco. Más tarde, HasanAdil et al. (2013) propusieron un enfoque híbrido basado en búsqueda de sección dorada y búsqueda tabú.

Ganguly et al. (2013) presentó un algoritmo evolutivo discreto diferencial híbrido basado en el enfoque de tamaños de lote variables. Estos autores combinaron un operador de búsqueda local “*greedy*” con un esquema de evolutivo discreto diferencial para obtener la cota inferior del problema, las frecuencias de producción, y la secuencia de producción para el problema. Este algoritmo supera al algoritmo genético híbrido propuesto por Moon et al. (2002).

2.1.2 Metodologías para resolver ELSP en problemas de múltiples máquinas

A medida que los investigadores exploran problemas prácticos con una complejidad más realista, un alejamiento de los métodos exactos ha sido necesario debido a los esfuerzos computacionales para resolver ELSP en múltiples instalaciones. Por esta razón, heurísticas y metaheurísticas se han aplicado hasta ahora porque la solución de ELSP usando métodos exactos aumenta la complejidad del problema. Las investigaciones relacionadas a las metodologías para resolver ELSP en entorno multi–instalación se presentan en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Métodos de solución para ELSP en problemas de múltiples máquinas

Tipo de Método	Entorno de Producción	Referencias
Exacto	Máquinas en paralelo	No hay estudios reportados
	Flow shop	No hay estudios reportados
	Flow shop flexible	No hay estudios reportados
	Job shop	No hay estudios reportados
	Job shop flexible	No hay estudios reportados
	Open shop	No hay estudios reportados
Heurística	Máquinas en paralelo	Carreno (1990), Bollapragada y Rao (1999), Pesenti y Ukovich (2003b), Haksöz y Pinedo (2011), Bollapragada, Croce y Ghirardi (2011)
	Flow shop	Ouenniche y Boctor (2001a), Ouenniche y Boctor (2001b), Ouenniche y Boctor (2001), Boctor y Poulin (2005), Huang y Yao (2006), Huang y Yao (2007)
	Flow shop flexible	Torabi, Fatemi Ghomi y Karimi (2005)
	Job shop	Ver <i>Híbridos</i>
	Job shop flexible	Torabi, Karimi y Fatemi Ghomi (2005)
	Open shop	No hay estudios reportados

Tipo de Método	Entorno de Producción	Referencias
Metaheurística	Máquinas en paralelo	Sun, Huang y Jaruphongsa (2009c)
	Flow shop	Ver <i>Híbridos</i>
	Flow shop flexible	Akrami, Karimi, y Hosseini (2006)
	Job shop	Ouenniche y Boctor (1998)
	Job shop flexible	No hay estudios reportados
	Open shop	No hay estudios reportados
Híbrido	Máquinas en paralelo	Chang y Yao (2008a), Chang y Yao (2010), Chan, Chung y Chan (2012)
	Flow shop	Huang y Yao (2008), Heydari, Karimi y Torabi (2009)
	Flow shop flexible	Jenabi et al. (2007)
	Job shop	Ouenniche y Bertrand (2001)
	Job shop flexible	No hay estudios reportados
	Open shop	No hay estudios reportados

▪ Heurísticas para ELSP en múltiples máquinas

Como se mencionó antes, Carreño (1990) fue el primer autor en publicar una investigación de ELSP para múltiples instalaciones. Este autor desarrolló un procedimiento heurístico para resolver ELSP en máquinas paralelas. Su método descompone el problema en los sub-problemas de asignación, programación y determinación de tamaño de lote. Luego, mejora uno de ellos manteniendo a lo demás constante. Bollapragada y Rao (1999) propusieron una heurística “greedy” simple y un enfoque basado iterativo de búsqueda para resolver ELSP en máquinas paralelas no relacionadas.

Pesenti y Ukovich (2003b) presentaron un procedimiento heurístico para generar programas de producción factibles con restricciones de recursos. Ellos evaluaron el desempeño de este método cuando los artículos se pueden asignar a muchas máquinas. Haksöz y Pinedo (2011) desarrollan una heurística basada en reglas de prioridad para asignación y programación de ítems para máquinas paralelas no idénticas. Bollapragada, Croce y Ghirardi (2011) presentaron un algoritmo “greedy” y una mat-heurística para resolver un ELSP discreto en máquinas paralelas idénticas.

Ouenniche y Boctor (2001b) desarrollaron una nueva heurística para resolver el ELSP en *flow shops* llamado *two-group heuristic* (método TG). En el mismo año, Ouenniche y Boctor (2001a) propusieron la heurística *G-group*, que es una generalización del método TG. Llegaron a la conclusión de que este nuevo método es mejor que el método TG, aunque la heurística *G-group* requiere más tiempo de computacional. Sin embargo, las limitaciones impuestas en la heurística TG podrían afectar la calidad de las soluciones obtenidas. Más tarde, Ouenniche y Boctor (2001) desarrollaron la heurística PT y proporcionan resultados computacionales que muestran que las soluciones obtenidas con estos tres métodos son mejores que los obtenidos con base en el enfoque de ciclo común.

Boctor y Poulin (2005) desarrollaron una heurística compuesta de dos fases para resolver ELSP en *flow shops* con demanda variante en el tiempo. La primera fase buscó construir una solución factible y, una vez que se obtiene este resultado, la segunda fase intenta mejorar esta solución con el fin de reducir el costo total relacionado con la programación de la producción y el nivel de inventario. Huang y Yao (2006) presentaron una versión mejorada de la heurística de Ouenniche y Boctor (O&B) (2001b), motivados por las desventajas de este método con respecto a la generación de programas de producción. Experimentos numéricos mostraron que la nueva heurística obtuvo mejores soluciones que la heurística O&B y ganó una mejora significativa en el valor de la función objetivo. Huang y Yao (2007) realizaron el mismo análisis a la heurística O&B y propusieron dos nuevas versiones de este método llamado la heurística H&Y y la heurística O&B modificada. Estos autores concluyeron que la heurística H&Y supera significativamente las últimas metodologías debido a la calidad de las soluciones.

Respeto a ELSP en *flow shops* flexibles, Torabi, Fatemi Ghomi y Karimi (2005) publicaron un programa no lineal entero mixta que determina la asignación a las máquina, secuenciación, tamaño del lote y la programación para cada instalación. Los autores propusieron un método heurístico enumeración para resolver este modelo en lugar de resolverlo directamente, con el fin de reducir la complejidad.

Sin embargo, los resultados experimentales indicaron que este método no pudo obtener una solución óptima para los problemas de medianos y de gran tamaño.

Torabi, Karimi y Ghomi (2005) desarrollaron un modelo de programación no lineal cero-uno mixto para determinar la asignación de productos a las máquinas, la secuenciación y el tamaño de lote decisiones a costo mínimo para ELSP en *job shops* flexibles. Ellos propusieron un procedimiento que enumera todos los valores factibles para los ciclos de producción en un horizonte de planificación y para cada uno, resuelve el modelo de optimización. Este método es similar a la propuesta de Ouenniche y Boctor. Sin embargo, los resultados indicaron que este método puede obtener una solución óptima sólo para problemas de tamaño pequeño y moderadamente medianos en un tiempo computacional razonable.

▪ **Metaheurísticas para ELSP en múltiples máquinas**

Debido a la complejidad de ELSP en un entorno compuesto por múltiples máquinas, varios autores abogan por la optimización estocástica y las técnicas de inteligencia computacional para resolver esta versión más complicada del problema. Sun, Huang y Jaruphongsra (2009c) desarrollaron dos algoritmos genéticos para resolver este problema en máquinas paralelas como un todo en lugar de dividirla en etapas, ya que la mejor solución obtenida a partir de esto es a lo mejor un óptimo local. Resultados computacionales mostraron que este algoritmo supera a la heurística de Carreno.

Akrami, Karimi y Hosseini (2006) desarrollaron un modelo mixto entero no lineal para determinar la secuencia, el tamaño del lote y el programa de producción en *flow shops* flexibles. Estos autores utilizaron un método enumerativo óptimo para resolver problemas de tamaño pequeño. Para obtener soluciones casi óptimas para problemas de medianos y de gran escala medianas, ellos propusieron un algoritmo genético y búsqueda tabú.

Ouenniche y Boctor (1988) desarrollaron un modelo de programación entera mixto no lineal para ELSP en *job shops*. Desafortunadamente, este modelo requiere un alto esfuerzo computacional para resolver problemas medianos y de gran tamaño. Por esta razón, los autores proponen una adaptación de algoritmo recocido simulado y búsqueda tabú para obtener una secuencia de producción de una de las máquinas y luego se utilizó este resultado como un dato de entrada para el modelo no lineal mixto para determinar los tamaños de lote y los tiempos de inicio del programa de producción. Llegaron a la conclusión de que ambos metaheurísticas son capaces de manejar este problema.

▪ **Métodos híbridos para ELSP en múltiples máquinas**

Desde que propio ELSP ya es NP-duro, la versión del problema en un entorno de múltiples instalaciones se ha abordado mediante una combinación de técnicas computacionales, heurísticas y metaheurísticas, debido a sus beneficios en dar soluciones mejoradas. Chang y Yao (2008a) propusieron un enfoque de tres fases utilizando el algoritmo genético, la heurística de Carreno y búsqueda binaria heurística para asignar productos a las instalaciones y generar programas factibles.

Chang y Yao (2010) propusieron dos enfoques en un esquema de dos fases utilizando la heurística de Carreno para asignar productos a instalaciones en paralelo. Cuando como asignación está asegurada, ellos emplearon la heurística de Dobson para resolver un problema ESLP en una sola instalación y generar una programación factible para cada instalación basado en el enfoque de tamaño variable. Chan, Chung y Chan (2012) propusieron dividir este problema en un problema maestro y sub-problemas, que se resuelven por programación entera y algoritmo genético, respectivamente. El problema principal se ocupa de la asignación óptima de los artículos a las instalaciones y para cada uno, se determina el tamaño del lote y la secuenciación.

Huang y Yao (2008) desarrollaron un algoritmo genético híbrido con la heurística Proc PLM y búsqueda binaria heurística para generar soluciones factibles para

ELSP en *flow shops*. Heydari, Karimi, y Torabi (2009) presentaron dos modelos enteros no lineales mixtos para abordar este problema. Estos autores desarrollan algunas heurísticas simples para determinar la secuencia de producción en las diferentes etapas y un algoritmo genético que aplica tanto una heurística de búsqueda de vecindad y un enfoque basado en el costo de inventario para generar la población inicial.

Jenabi et al. (2007) propusieron un modelo matemático mixto cero-uno cuya solución óptima determina la asignación, la secuenciación, el tamaño del lote y las decisiones de programación en un *flow shop* flexible. Estos autores desarrollaron un algoritmo genético híbrido y recocido simulado para resolver medianos y grandes problemas. Además, propusieron un algoritmo de búsqueda local para mejorar la calidad de la solución obtenida a través las metaheurísticas mencionadas. Los resultados experimentales indican que el algoritmo genético híbrido ofrece mejores soluciones que SA.

Ouenniche y Bertrand (2001) abordaron el problema ELSP en *job shops* como un programa mixto no lineal y propusieron un nuevo marco de programación cíclica llama el método de ciclo múltiple. Estos autores desarrollaron este método de solución para descomponer el problema en tres sub-problemas. El sub-problema de asignación se resolvió usando una heurística basada en el método MC, mientras que la decisión de secuenciación se determina utilizando ya sea una adaptación de recocido simulado o búsqueda tabú. Entonces, el sub-problema de tamaño de lote y programación de producción se resolvió al óptimo utilizando programación matemática basada en los resultados de los procedimientos anteriores.

2.1.3 Desarrollo del estado del arte de ELSP

Con el fin de identificar brechas en el desarrollo del conocimiento sobre el problema planteado, a continuación, se presenta un análisis estadístico en donde

se consideró el entorno de producción, tipo de función objetivo y tipo de solución utilizada.

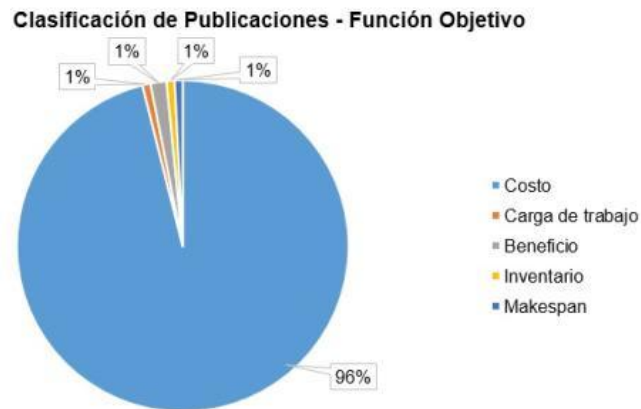
Con base en los resultados presentados anteriormente, se puede observar en la Figura 2-1 que solamente el 20% de las publicaciones encontradas consideran el problema ELSP en un sistema diferente a una sola máquina por lo tanto es evidente la brecha existente en el desarrollo de investigación en entornos conformados por múltiples máquinas.

Figura 2-1: Clasificación de publicaciones con base en el entorno de producción



En cuanto al tipo de función objetivo, se observa en la Figura 2-2 que en el 96% de las publicaciones se buscó minimizar el costo de producción, inventario y alistamiento. Otros consideraron carga de trabajo, inventario, tiempo de terminación o maximizar el beneficio. Por lo tanto, existe una brecha en el desarrollo de investigaciones en donde se consideren otros factores tales como el costo de energía asociado a la producción y al alistamiento de los recursos, el cual ningún autor tuvo en cuenta en su propuesta de solución.

Figura 2-2: Clasificación de publicaciones con base en la función objetivo



De la Figura 2-3 se tiene que solamente el 2% de las publicaciones encontradas consideraron múltiples objetivos. Cabe resaltar que estas dos investigaciones se desarrollaron para sistemas de una sola máquina, lo cual deja un espacio para publicaciones que propongan soluciones de este tipo especialmente para entornos compuestos por múltiples instalaciones.

Figura 2-3: Clasificación de publicaciones con base en el tipo de función objetivo



La distribución de los estudios de investigación relacionados con ELSP en una sola máquina se presenta en la Figura 2-4. Esta clasificación indica que las heurísticas son las propuestas que predominan en la literatura en comparación con métodos exactos que proporcionan una solución óptima para el problema

(43% vs. 21% artículos de artículos). Los estudios demostraron que ELSP en una sola instalación es un problema complejo, más aún cuando se trata de una versión sin restricciones. Por lo tanto, las investigaciones han sugerido enfoques constructivos para resolver este problema.

La aplicación de metaheurísticas para resolver ELSP en una sola máquina aun es poca (26% de los artículos revisados), sin embargo, su desempeño es muy prometedor. Entre las diferentes técnicas de búsqueda estocástica conocidas, los algoritmos genéticos (GA) han sido una muy buena elección y ampliamente utilizadas en muchos estudios (Chung & Chan, 2012; Ilkyeong Moon et al., 2002; Sarker & Newton, 2002). Pocos autores han optado por métodos híbridos en lugar de resolver este problema utilizando heurísticas o meta-heurísticas puras (10% de los artículos). Esto puede ser una línea de investigación para el desarrollo de nuevas metodologías para mejorar las soluciones más conocidas para ELSP una sola instalación.

Figura 2-4: Proporción de publicaciones con base en el método de solución para ELSP en una sola máquina



Con respecto a las metodologías para la solución de ELSP en múltiples instalaciones, la Figura 2-5 presenta la distribución porcentual de artículos de acuerdo con este esquema de clasificación. Como se ha mencionado antes, no hay investigaciones en donde se aplique un método exacto para resolver este

problema debido a su complejidad. Los métodos heurísticos son populares en esta corriente de investigación, seguida de hibridaciones entre heurísticas y metaheurísticas para la mejora de las soluciones (57% vs. 30% artículos de artículos, respectivamente).

La implementación de metaheurísticas puras es un área para explorar con mayor profundidad (13% de los artículos). La mayoría de estos estudios proponen resolver este problema por medio de GA dado su buen desempeño y calidad de las soluciones. Esto indica que hay una oportunidad para proponer otras metaheurísticas y comparar las mejores soluciones conocidas con aquellas obtenidas a través de otras técnicas de búsqueda estocástica.

Figura 2-5: Proporción de publicaciones con base en el método de solución para ELSP en múltiples máquinas



Según Santander–Mercado y Jubiz–Díaz (2016), existen las siguientes brechas en el estado del arte del problema ELSP:

- No se ha desarrollado investigaciones en donde se consideren las unidades de empaque por referencia en la programación de lotes de producción en sistemas multi–producto.

- No se ha considerado el costo de energía consumida por los equipos para la producción de diferentes tipos de referencias, así como en el alistamiento de los recursos al momento de pasar de la fabricación de un tipo de ítem a otro.
- La mayoría de las investigaciones se concentraron en minimizar el costo de producción, inventario y alistamiento. Solo se encontraron dos trabajos en donde se tenía más de un objetivo, los cuales fueron desarrollados en sistemas de una sola máquina.
- Son pocas las investigaciones en las cuales se ha implementado el problema ELSP en sistemas complejos de producción tales como *flow shop* y *job shops*. Además, no se ha publicado trabajos en donde se haya desarrollado este problema en *open shops*.

2.2 Tamaño de Lote de Empaque

El empaque es un sistema para preparar productos de forma segura, eficiente y efectiva para su manejo, transporte, distribución, almacenamiento, venta, consumo y recuperación (Saghir, 2004). Existen funciones del empaque que están relacionadas con actividades logísticas (tales como preservación del producto y transporte de carga) como con el mercadeo (información del producto). Según Saghir (2004) existen cuatro tipos de empaque de acuerdo al impacto que estos pueden tener en los costos logísticos y potencial de mercadeo: empaques estándar, empaques deseables, empaques menos eficientes y empaques únicos. Wagner (2002) afirma que el tamaño del empaque es un factor clave que tiene gran influencia en la efectividad de toda la cadena de valor.

Para definir el tamaño de empaque se deben considerar diferentes variables tales como materiales, dimensiones, diseño, etc., es decir, cualquier modelo requiere la determinación de factores a optimizar como medidas de desempeño (García & Prado, 2006). Sin embargo, según Wen et al. (2012), determinar el tamaño de empaque correcto para la distribución ha sido un modelo que apenas se ha trabajado desde 2002, pero solo enfocado en centros de distribución (CeDi) y no desde plantas de producción.

En un estudio realizado por García y Prado (2006) se destaca que en América Latina es necesario desconsolidar entre el 60% y 90% de las unidades de empaque para poder atender los pedidos de los clientes de la cadena de suministro. Esto evidencia una mala definición del tamaño de empaque y la existencia de sobrecostos logísticos que pueden ser disminuidos. Por lo tanto, es necesario diseñar herramientas aplicables a diferentes contextos que permita definir los empaques en la cadena de suministro.

Wen et al. (2012) y Mejía Argueta et al. (2015) afirman que determinar el tamaño de empaque ha sido un modelo que solamente se ha enfocado en centros de distribución (CeDi) y no desde las plantas de producción. Estos autores desarrollaron un modelo de optimización para determinar el tamaño de empaque para el transporte de productos desde un CeDi a un conjunto de almacenes, considerando los costos de manipulación e inventario.

Leung, Wong y Mok (2008) proponen un modelo para minimizar el número de empaques con los que se atiende a clientes, mientras se optimiza su tamaño considerando las medidas de los productos y las cantidades de cada uno. Wang (2010) plantea un modelo de optimización para combinar productos en un mismo empaque, minimizando los costos de manipulación, de abrir empaques y penalizaciones por desajustes. Tápler y Csík (2010) estudiaron el caso de una línea de ensamble controlada por un sistema *kanban*, donde un fabricante puede solicitar al vendedor que defina la cantidad de empaque. Estos autores desarrollaron un modelo de optimización del tamaño de empaque, minimizando el costo de manejo de material y de inventario.

Por su parte, Yesodha y Amudha (2012) analizaron dos heurísticas con base en el problema de empaque binario con el fin de encontrar cuantas unidades se deben introducir en un empaque considerando restricciones de capacidad. Sin embargo, dichos algoritmos no son lo bastante aplicados a un contexto real. Sternbeck (2014) desarrolló un modelo de minimización de costos para

determinar la cantidad de productos en una orden de empaque para ser distribuidos a diferentes detallistas, considerando los costos de manipulación y mantenimiento de inventario. Gámez Albán et al. (2015) desarrollaron un modelo de optimización para definir la cantidad de productos a incluir en un empaque, minimizando el costo total asociado con las actividades de la cadena de suministro en múltiples canales.

Se puede afirmar que las propuestas de modelos de optimización de tamaño de empaque ha sido un tema que se ha enfocado en la operación de las cadenas de suministros y actividades logísticas. No se encontró una investigación que desarrollara una estrategia de empaque para un conjunto de productos diferentes y la operación de un sistema de fabricación de una o múltiples instalaciones. Por lo tanto, se puede identificar una brecha en el desarrollo de metodologías para darle solución a este problema desde los sistemas productivos.

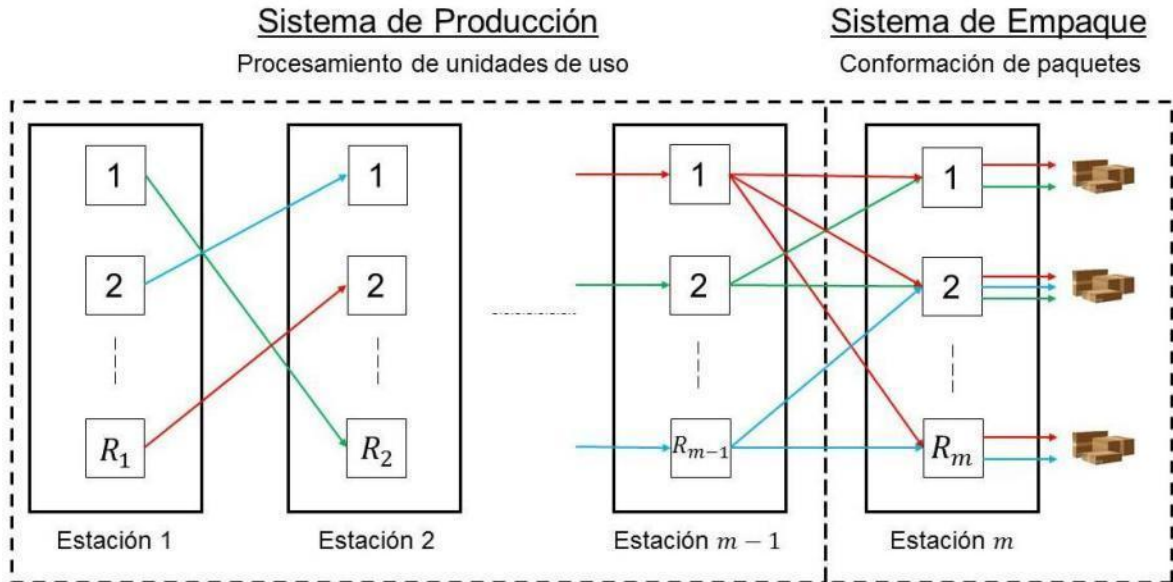
3.Estrategia de Solución para la Planeación y Programación de la Producción basado en Sistemas Multiproducto–Multiempaque

En este capítulo se presenta el diseño de la estrategia de solución para la planeación y programación de la producción de un sistema multiproducto–multiempaque. La descripción del problema, sistema producción/empaque y estrategia de solución se presentan en la Sección 3.1, mientras que la formulación matemática del problema planteado se aborda en la Sección 3.2. Finalmente, el algoritmo propuesto para resolver el modelo matemático se desarrolla en la Sección 3.3.

3.1 Descripción del Problema y Estrategia de Solución

El sistema multiproducto–multiempaque está representado por un *flow shop* flexible que recibe pedidos compuestos por una o más referencias, cada uno con un tiempo de entrega. Los pedidos son desconsolidados y agrupados por referencia, es decir, se tiene una demanda determinística d_i de la referencia i . Esta demanda se suple con lotes de venta (paquetes) de determinado tamaño.

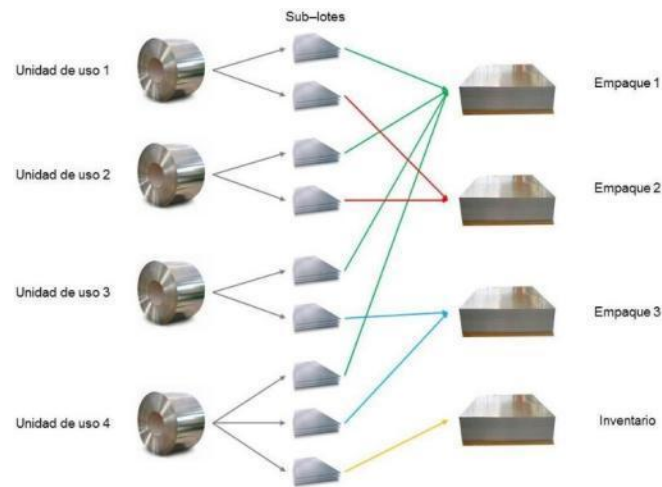
En cuanto al sistema *flow shop* flexible, sea m el número de estaciones en donde la estación 1 hasta la estación $m - 1$ corresponde al sistema de producción y la estación m al sistema de empaque. Cada estación tiene R_j recursos en paralelo, idénticos en todas sus características tales como tiempos de procesamiento y alistamiento. Además, el sistema producción/empaque está activo un porcentaje del horizonte de planeación, es decir, la efectividad de la línea es conocida. La estructura del sistema producción/empaque se presenta en la Figura 3-1.

Figura 3-1: Esquema del sistema producción/empaque

Para cumplir con la demanda por referencia, es necesario procesar N_i unidades enteras de materia prima (las cuales se llamarán *unidades de uso*) de acuerdo con el nivel de inventario inicial u_i de producto terminado. No se permite dividir la unidad de uso en sub-lotes para ser transferidos a la siguiente estación del sistema de producción, es decir, el lote de transferencia es igual a uno entre las estaciones 1 hasta $m-1$.

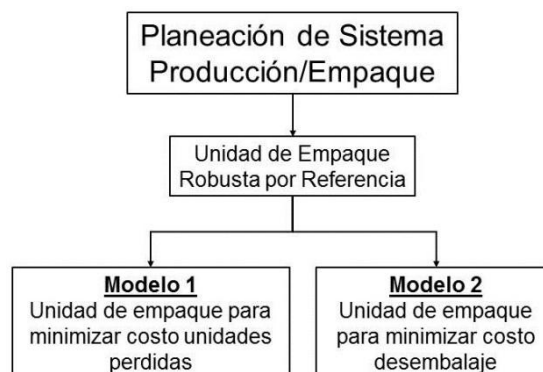
Una vez que las unidades de uso de la referencia i terminan de ser procesadas en la estación $m-1$, estas se dividen en sub-lotes para conformar los empaques en la estación m . Un empaque de la referencia i puede construirse a partir de un número de sub-lotes que provienen de diferentes unidades de uso de esta misma referencia. Un ejemplo de la desagregación de las unidades de uso para conformar empaques de un tamaño determinado se muestra en la Figura 3-2.

Figura 3-2: División de unidades de uso para construir empaques



Este problema involucra una parte combinatoria (asignación de componentes a recursos en las estaciones y su secuencia de procesamiento en cada máquina por estación) y una parte continua (determinar el tamaño de empaque por referencia y los tiempos de inicio de producción/empaque de las unidades de uso/paquetes en cada estación). Adicionalmente, la demanda d_i no siempre es múltiplo del tamaño de empaque dada su variabilidad. Por lo tanto, se debe determinar si es más económico despachar una cantidad mayor que d_i y perder producto terminado o vender el valor de d_i y desembalar empaques. El esquema general de la propuesta de solución para abordar el problema mencionado anteriormente se presenta en la Figura 3-3.

Figura 3-3: Esquema de estrategia de solución para la planeación y programación del sistema producción/empaque



Por lo tanto, se desarrollarán los siguientes dos modelos matemáticos:

- Modelo 1: Programación de producción y tamaño de empaque por referencia para minimizar el costo de pérdida de producto terminado.
- Modelo 2: Programación de producción y tamaño de empaque por referencia para minimizar costo de desembalaje.

En los dos modelos se minimizará el costo inventario, costo por adelanto/tardanza respecto a los tiempos de entrega y el impacto ambiental generado por el funcionamiento del sistema producción/empaque. Ambos modelos serán multi-objetivo, en donde el primero corresponde a la función de costos totales y el segundo está relacionado con el impacto ambiental.

3.2 Formulación Matemática

Los siguientes supuestos son considerados para la formulación del problema:

- Cada unidad de uso puede ser procesada por un solo recurso en cada estación del sistema de producción.
- Los recursos en las estaciones $j = 1, \dots, m - 1$ pueden procesar una sola unidad de uso a la vez, así como los recursos de la estación m pueden conformar un solo empaque a la vez.
- La secuencia de producción para cada recurso en cada estación es única y es determinada por el método de solución.
- Los tiempos de alistamiento son dependientes de la secuencia.
- No se permite dividir la unidad de uso en sub-lotes para ser transferidos a la siguiente estación del sistema de producción $j = 1, \dots, m - 1$.
- En cualquier estación, una vez el procesamiento de una unidad de uso o el empackado de producto terminado inicie, este debe ser completado sin interrupción.
- La capacidad total de las diferentes estaciones es suficiente para suplir la demanda.

La notación utilizada para la formulación del problema se define, como sigue:

Parámetros

n	número de referencias
N_i	número de unidades de uso de la referencia i $N_i = \lceil \max(0, d_i - u_i) \rceil$
H_i	número de empaques de la referencia i $H_i = \left\lceil \frac{N_i + u_i}{Q_i} \right\rceil$
m	número de estaciones
R_j	número de recursos idénticos en paralelo en la estación j
L	número de posiciones en la secuencia; $L = \sum_i N_i$
i, u	índices de referencias; $i, u = 1, \dots, n$ donde $i \neq u$
w, v	índices de unidades de uso; $w, v = 1, \dots, N_i$ donde $w \neq v$
h, g	índices de empaque; $h, g = 1, \dots, H_i$ donde $h \neq g$
j	índice de estación; $j = 1, \dots, m$
k	índice del recurso; $k = 1, \dots, R_j$
l	índice de posición en la secuencia; $l = 1, \dots, L$
W_{hi}	sub set de todos los $w \in N_i$ que son compatibles con el empaque h de la referencia i
V_{hi}	sub set de todos los $v \in N_i$ que son compatibles con el empaque h de la referencia i
p_{ij}	tiempo de procesamiento/empaque de una unidad de uso de la referencia i en la estación j
s_{iuj}	tiempo de alistamiento entre la referencia i y la referencia u en la estación j
s_{0ij}	tiempo de alistamiento de la referencia i cuando es la referencia inicial en la secuencia de la estación j
d_i	demanda consolidada de la referencia i
u_i	inventario inicial de producto terminado de la referencia i
due_{hwi}	tiempo de entrega del sub-lote asociado al empaque h de la unidad de uso w de la referencia i
C_i^P	costo por unidad perdida de la referencia i
C_i^D	costo de desembalaje de un empaque de producto terminado de la referencia i
C_i^H	costo de inventario de producto terminado de la referencia i
C_{hwi}^E	costo por adelanto en entrega del sub-lote asociado al empaque h de la unidad de uso w de la referencia i

C_{hwi}^T	costo por tardanza en entrega del sub-lote asociado al empaque h de la unidad de uso w de la referencia i
CO^E	kilogramos de CO_2 emitidos por kilovatio–hora de energía
ξ	efectividad de la línea de producción–empaque
τ	tiempo total disponible del sistema producción–empaque
M	número real grande

Variables

b_{wij}	tiempo de inicio de procesamiento de la unidad de uso w de la referencia i en la estación j
b_{hwi}	tiempo de inicio de empackado del sub-lote asociado al empaque h de la unidad de uso w de la referencia i
X_{wilkjh}	$\begin{cases} 1, & \text{si la unidad de uso } w \text{ de la referencia } i \text{ está en la } l\text{--ésima posición} \\ & \text{de secuencia en el recurso } k \text{ de la estación } j \text{ asignada al empaque } h \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$
Y_{hwi}	tamaño del sub-lote asociado al empaque h dado por la unidad de uso w de la referencia i
C_{hwi}	tiempo de finalización de empackado del sub-lote asociado al empaque h de la unidad de uso w de la referencia i
Z_i	inventario final de la referencia i
E_{hwi}	adelanto en la entrega del sub-lote asociado al empaque h de la unidad de uso w de la referencia i
T_{hwi}	tardanza en la entrega del sub-lote asociado al empaque h de la unidad de uso w de la referencia i
Q_i	tamaño de empaque de la referencia i

En las siguientes dos secciones se presentará los modelos multi–objetivo para determinar la unidad de empaque para (1) minimizar el costo de unidades perdidas y (2) minimizar el costo de desembalaje.

3.2.1 Unidad de Empaque para Minimizar Costo de Unidades Perdidas (Modelo 1)

La función de costo total (primer objetivo) para este modelo involucra tres expresiones. La primera está relacionada con el costo que se incurre por la pérdida de unidades de producto terminado al despachar una cantidad mayor a la demanda. El número de unidades perdidas por referencia es igual a

$$Unidades\ perdidasi = Cantidad\ a\ despachari - Demandai$$

Para cumplir con la demanda, es necesario despachar $\lfloor d_i/Q_i \rfloor$ empaques de tamaño Q_i y decidir si el último empaque es de tamaño Q_i o el empaque de tamaño igual a la mantisa de N_i/Q_i . Esta decisión depende del número de empaques de producto terminado restantes al despachar los $\lfloor d_i/Q_i \rfloor$ empaques de tamaño Q_i , el cual equivale a $\frac{N_i+u_i}{Q_i} - \lfloor d_i/Q_i \rfloor$.

Si esta cantidad restante es mayor o igual a uno, se despacharía un empaque de tamaño Q_i ; de lo contrario, un empaque de tamaño $Q_i \left(\frac{N_i+u_i}{Q_i} - \lfloor d_i/Q_i \rfloor \right)$. Por lo tanto, el tamaño del último empaque es $Q_i \left(\min \left\{ \frac{N_i+u_i}{Q_i} - \lfloor d_i/Q_i \rfloor; 1 \right\} \right)$. Este empaque se vende si hay demanda faltante una vez se han despachado los $\lfloor d_i/Q_i \rfloor$ empaques, la cual equivale a $d_i/Q_i - \lfloor d_i/Q_i \rfloor$. Por lo tanto, la cantidad total de producto terminado que se despacha para cumplir con la demanda por referencia es

$$C_{despachar} = Q_i \left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor + \left(Q_i \left(\min \left\{ \frac{N_i+u_i}{Q_i} - \left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor; 1 \right\} \right) \right) \left(\left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor - \left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor \right)$$

El número de unidades perdidas de la referencia i es igual a

$$C_{perdida} = \left(Q_i \left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor + \left(Q_i \left(\min \left\{ \frac{N_i+u_i}{Q_i} - \left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor; 1 \right\} \right) \right) \left(\left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor - \left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor \right) \right) - d_i$$

El costo total de unidades perdidas de todas las referencias se representa con la siguiente función

$$TC_{perdida} = \sum_{i=1}^n \left(C_i^P \left(\left(Q_i \left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor + \left(Q_i \left(\min \left\{ \frac{N_i+u_i}{Q_i} - \left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor; 1 \right\} \right) \right) \left(\left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor - \left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor \right) \right) - d_i \right) \right)$$

El segundo término de la función de costos está relacionado con el inventario final, el cual es igual a $N_i + u_i - C_{despachar}$, es decir

$$Inv_{final} = N_i + u_i - Q_i \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor - \left(Q_i \left(\min \left\{ \frac{N_i + u_i}{Q_i} - \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor; 1 \right\} \right) \right) \left(\left\lfloor d_i - Q_i \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor \right\rfloor \right)$$

Por lo tanto, el costo total de inventario de todas las referencias equivale a

$$TC_{inventario} = \sum_{i=1}^n \left(C_i^H \left[N_i + u_i - Q_i \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor - \left(Q_i \left(\min \left\{ \frac{N_i + u_i}{Q_i} - \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor; 1 \right\} \right) \right) \left(\left\lfloor d_i - Q_i \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor \right\rfloor \right) \right] \right)$$

El último término de la función objetivo es la penalización por adelanto/tardanza en la entrega de los paquetes, el cual se expresa como sigue:

$$TC_{adelanto/tardanza} = \sum_{i=1}^n \sum_{w \in W_{hi}} \sum_{h=1}^{H_i} (C_{hwi}^E \cdot E_{hwi} + C_{hwi}^T \cdot T_{hwi})$$

El costo total del sistema producción/empaque al adicionar los tres términos anteriores es

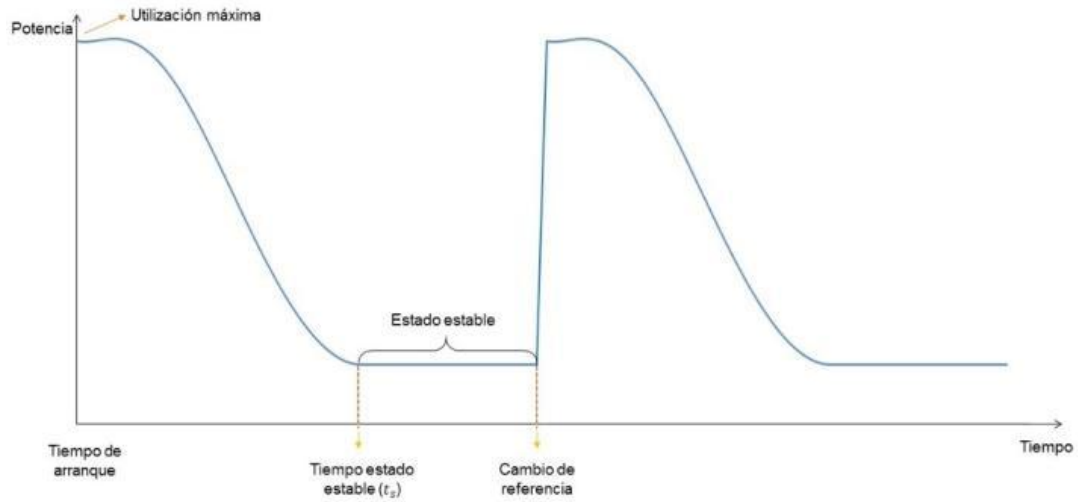
$$\begin{aligned} TC = & \sum_{i=1}^n \left(C_i^P \left[\left(Q_i \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor + \left(Q_i \left(\min \left\{ \frac{N_i + u_i}{Q_i} - \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor; 1 \right\} \right) \right) \left(\left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} - \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor \right\rfloor \right) - d_i \right] \right) \right. \\ & + \sum_{i=1}^n \left(C_i^H \left[N_i + u_i - Q_i \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor - \left(Q_i \left(\min \left\{ \frac{N_i + u_i}{Q_i} - \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor; 1 \right\} \right) \right) \left(\left\lfloor d_i - Q_i \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor \right\rfloor \right) \right] \right) \\ & \left. + \sum_{h=1}^{H_i} \sum_{w \in W_{hi}} \sum_{i=1}^n (C_{hwi}^E \cdot E_{hwi} + C_{hwi}^T \cdot T_{hwi}) \right) \end{aligned}$$

El segundo objetivo hace referencia al impacto ambiental, es decir, los kilogramos de dióxido de carbono CO₂ emitidos por la utilización de energía. La energía resulta de la potencia eléctrica consumida por la operación de las máquinas en el sistema producción. Cada recurso del sistema inicia el procesamiento/empaque de una unidad de uso/sub-lote utilizando la máxima potencia (P_{max}) al arrancar

desde el reposo. Esta potencia va disminuyendo en función del tiempo que ha transcurrido desde el arranque.

A partir de un tiempo t_s , la potencia de la máquina alcanza el estado estable y cuando se realiza un alistamiento vuelve a ser P_{max} . Este comportamiento se repite tantos cambios de referencia se realicen a lo largo del tiempo de operación. En la Figura 3-4 se presenta una gráfica del comportamiento característico de la potencia eléctrica en función del tiempo.

Figura 3-4: Curva de potencia eléctrica en función del tiempo



El comportamiento de la potencia utilizada en función del tiempo por máquina k de la estación j entre alistamientos por cambio de referencia se representa mediante una curva característica general $f_{(t)}^{kj}$. Esta función depende el tipo de máquina y sus especificaciones. La energía eléctrica utilizada por recurso es el producto de la potencia eléctrica acumulada (área bajo la curva $f_{(t)}^{kj}$) y el tiempo de operación. La utilización total de energía en todo el sistema de producción/empaque es igual a

$$U_{energía} = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{R_j} \left(t \int_{t=0}^t f_{(t)}^{kj} dt \right)$$

El impacto ambiental en función de la energía viene dado por la siguiente expresión

$$EI = CO^E \left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{R_j} \left(t \int_{t=0}^t f_{(t)}^{kj} dt \right) \right]$$

Con base en las funciones objetivo y la relación entre las variables del problema, el modelo que determina la unidad de empaque robusta para minimizar el costo de unidades perdidas se presenta a continuación.

$$(1) \quad \begin{aligned} \text{Min Costo} = & \sum_{i=1}^n \left(C_i^p \left[\left(Q_i \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor + \left(Q_i \left(\min \left\{ \frac{N_i + u_i}{Q_i} - \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor; 1 \right\} \right) \left(\left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor \right) \right) - d_i \right] \right) \right. \\ & + \sum_{i=1}^n \left(C_i^H \left[N_i + u_i - Q_i \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor - \left(Q_i \left(\min \left\{ \frac{N_i + u_i}{Q_i} - \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor; 1 \right\} \right) \left(d_i - Q_i \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor \right) \right] \right) \right. \\ & \left. + \sum_{i=1}^n \sum_{w \in W_{hi}} \sum_{h=1}^{H_i} (C_{hwi}^E \cdot E_{hwi} + C_{hwi}^T \cdot T_{hwi}) \right) \end{aligned}$$

$$(2) \quad \text{Min Impacto} = CO^E \left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{R_j} \left(t \int_{t=0}^t f_{(t)}^{kj} dt \right) \right]$$

Sujeto a:

$$(3) \quad b_{wij-1} + p_{ij-1} \leq b_{wij} \quad \forall w = 1, \dots, N_i; i = 1, \dots, n; j = 2, \dots, m-1$$

$$(4) \quad b_{wi,m-1} + p_{i,m-1} \leq b_{hwi} \quad \forall h = 1, \dots, H_i; w \in W_{hi}; i = 1, \dots, n$$

$$(5) \quad b_{wij} + p_{ij} + s_{iuj} - b_{vuj} \leq M \left[2 - \sum_{h=1}^{H_i} (X_{wilkmjh} \cdot Y_{hwi}) - \sum_{h=1}^{H_i} (X_{vu,l+1,kjh} \cdot Y_{hvu}) \right]$$

$$\forall i, u = 1, \dots, n; w = 1, \dots, N_i; v = 1, \dots, N_u; l < L; k = 1, \dots, R_j; j = 1, \dots, m-1; \text{ si } i = u \rightarrow w \neq v$$

$$(6) \quad b_{hwi} + p_{im} \cdot Y_{hwi} + s_{ium} - b_{gvu} \leq M(2 - X_{wilkmh} - X_{vu,l+1,kmg}) \quad \forall i, u = 1, \dots, n; w \in W_{hi}; v \in V_{gi}; l < L; k = 1, \dots, R_m; h, g = 1, \dots, H_i; \text{ si } h = g \rightarrow w \neq v$$

$$(7) \quad \sum_{k=1}^{R_j} \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^{H_i} X_{wilkmjh} \cdot Y_{hwi} = 1 \quad \forall w = 1, \dots, N_i; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m-1$$

$$(8) \quad \sum_{k=1}^{R_m} \sum_{l=1}^L X_{wilkmh} = 1 \quad \forall w \in W_{hi}; i = 1, \dots, n; h = 1, \dots, H_i$$

$$(9) \quad \sum_{i=1}^n \sum_{w=1}^{N_i} \sum_{h=1}^{H_i} X_{wilkmjh} \cdot Y_{hwi} \leq 1 \quad \forall j = 1, \dots, m-1; k = 1, \dots, R_j; l = 1, \dots, L$$

- $$(10) \quad \sum_{i=1}^n \sum_{w \in W_{hi}} \sum_{h=1}^{H_i} X_{wilkmh} \leq 1 \quad \forall k = 1, \dots, R_m; l = 1, \dots, L$$
- $$(11) \quad b_{wij} \geq s_{0ij} \sum_{k=1}^{R_j} \sum_{h=1}^{H_i} X_{wi1kjh} \cdot Y_{hwi} \quad \forall i = 1, \dots, n; w = 1, \dots, N_i; j = 1, \dots, m-1$$
- $$(12) \quad b_{hwi} \geq s_{0im} \sum_{k=1}^{R_m} X_{wi1kmh} \quad \forall i = 1, \dots, n; w \in W_{hi}; h = 1, \dots, H_i$$
- $$(13) \quad \sum_{i=1}^n \sum_{w=1}^{N_i} \sum_{h=1}^{H_i} X_{wi,l+1,kjh} \cdot Y_{hwi} \leq \sum_{i=1}^n \sum_{w=1}^{N_i} \sum_{h=1}^{H_i} X_{wilkhj} \cdot Y_{hwi} \quad \forall j = 1, \dots, m-1; k = 1, \dots, R_j; l < L$$
- $$(14) \quad \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^{H_i} X_{wi,l+1,kmh} \leq \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^{H_i} X_{wilkmh} \quad \forall w \in W_{hi}; k = 1, \dots, R_m; l < L$$
- $$(15) \quad \sum_{h=1}^{H_i} X_{wilkhj} \cdot Y_{hwi} = 1 \quad \forall w = 1, \dots, N_i; i = 1, \dots, n; l = 1, \dots, L; k = 1, \dots, R_j; j = 1, \dots, m$$
- $$(16) \quad \sum_{w=1}^{N_i} X_{wilkhj} \cdot Y_{hwi} = Q_i \quad \forall h = 1, \dots, H_i - 1; i = 1, \dots, n; l = 1, \dots, L; k = 1, \dots, R_j; j = 1, \dots, m$$
- $$(17) \quad \sum_{w=1}^{N_i} X_{wilkhj} \cdot Y_{hwi} = N_i - Q_i(H_i - 1) \quad \forall h = H_i; i = 1, \dots, n; l = 1, \dots, L; k = 1, \dots, R_j; j = 1, \dots, m$$
- $$(18) \quad Y_{hwi} \leq Q_i \quad \forall w = 1, \dots, N_i; i = 1, \dots, n; h = 1, \dots, H_i$$
- $$(19) \quad C_{hwi} \geq b_{hwi} + p_{im} \cdot Y_{hwi} \quad \forall w \in W_{hi}; i = 1, \dots, n; h = 1, \dots, H_i$$
- $$(20) \quad E_{hwi} \geq due_{hwi} - C_{hwi} \quad \forall w \in W_{hi}; i = 1, \dots, n; h = 1, \dots, H_i$$
- $$(21) \quad T_{hwi} \geq C_{hwi} - due_{hwi} \quad \forall w \in W_{hi}; i = 1, \dots, n; h = 1, \dots, H_i$$
- $$(22) \quad \tau \cdot \xi - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{R_j} \sum_{l=1}^{L-1} (s_{iu,j} \cdot X_{wilkhj} \cdot X_{vu,l+1,kjh}) \geq C_{hwi} \quad \forall w \in W_{hi}; v \in V_{gi}; i, u = 1, \dots, n; h = 1, \dots, H_i; si i = u \rightarrow w \neq v$$
- $$(23) \quad Z_i = N_i + u_i - Q_i \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor - \left(Q_i \left(\min \left\{ \frac{N_i + u_i}{Q_i} - \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor; 1 \right\} \right) \right) \left(\left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{d_i}{Q_i} \right\rfloor \right) \quad \forall i = 1, \dots, n$$
- $$(24) \quad b_{wij}, b_{hwi}, Y_{hwi}, C_{hwi}, Z_i, E_{hwi}, T_{hwi}, Q_i \geq 0; \quad \forall w, i, h, j, \quad X_{wilkhj} \in \{0,1\}; \quad \forall w, i, l, k, j, h$$

Este problema tiene las siguientes restricciones. Las restricciones (3) afirman que ninguna unidad de uso puede ser procesada antes de ser completada en la

estación anterior. Las restricciones (4) garantizan que el tiempo de inicio de empaque de cada sub–lote no puede ser menor que el tiempo de terminación del procesamiento de la unidad de uso asociada a ese sub–lote en la etapa anterior. Las restricciones (5) muestran que ninguna unidad de uso puede ser procesada antes de la terminación de su predecesor en la secuencia de producción, mientras que las restricciones (6) afirman que ningún sub–lote puede ser empacado antes de la terminación de su predecesor en la secuencia de empaque.

Las restricciones (7) representan que cada unidad de uso tiene una única posición en la secuencia de producción de una máquina en cada estación y las restricciones (8) implican que cada sub–lote tiene una única posición en la secuencia de un recurso en la estación de empaque. Las restricciones (9) aseguran que se asigne a lo sumo una unidad de uso en cada posición de la secuencia de producción de cada máquina y las restricciones (10) afirman que, en cada posición de la secuencia de empaque de cada recurso, hay a lo sumo un sub–lote.

Las restricciones (11) muestran que, si la unidad de uso w de la referencia i es el primer componente de la secuencia de una máquina en la estación j , su procesamiento no puede iniciar antes del alistamiento de la máquina correspondiente, mientras que las restricciones (12) implican que, si el sub–lote asociado al paquete h de la referencia i es el primer componente de la secuencia de un recurso de la estación m , su empaque no puede iniciar antes del alistamiento del recurso correspondiente. Las restricciones (13) representan que una unidad de uso puede ser asignada en una posición de la secuencia en una máquina, si otra unidad de uso fue asignada en la posición anterior en la secuencia de esa máquina y las restricciones (14) afirman que un sub–lote puede ser asignado en una posición de la secuencia de empaque en un recurso, si otro sub–lote fue asignado en la posición anterior en la secuencia de ese recurso.

Las restricciones (15) implican que la unidad de uso w de la referencia i se ha utilizado en su totalidad para la construcción de los H_i empaques. Las restricciones (16) aseguran que las participaciones de las unidades de uso de referencia i construyan $H_i - 1$ empaques de tamaño Q_i , mientras que las restricciones (17) aseguran que las participaciones de las unidades de uso de referencia i construya un empaque de tamaño $N_i - Q_i(H_i - 1)$. Las restricciones (18) muestran que el tamaño de cada sub-lote asociado al empaque h dado por la unidad de uso w de la referencia i no puede superar el tamaño de empaque Q_i .

Las restricciones (19), (20) y (21) calculan el tiempo de terminación de empackado, el adelanto y la tardanza de los sub-lotes. Las restricciones (22) afirman que los tiempos de terminación de empackado no pueden exceder el tiempo total disponible dado los alistamientos y la efectividad de línea producción–empaque. Las restricciones (23) representan el balance de inventario por referencia. Las restricciones (24) son las restricciones de no negatividad para las variables.

3.2.2 Unidad de Empaque para Minimizar Costo de Desembalaje (Modelo 2)

La función de costo total para este modelo también involucra tres expresiones, en donde la última (costo por adelanto/tardanza) se expresa igual que al modelo anterior. A diferencia del modelo anterior, la primera está relacionada con el costo de desembalaje al abrir empaques de cada referencia. Este costo se asume si hay demanda por suplir una vez se ha despachado $\lfloor d_i/Q_i \rfloor$ empaques de tamaño Q_i .

La demanda faltante en número de empaques de tamaño Q_i una vez se ha despachado esta cantidad es igual a $d_i/Q_i - \lfloor d_i/Q_i \rfloor$. Si esta demanda es mayor a cero, es necesario desembalar un empaque; de lo contrario, no se incurre en este costo. El número de empaques a desembalar se expresa como sigue

$$E_{deseembalar} = \left\lceil d_i/Q_i - \left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor \right\rceil$$

El costo total de desembalaje de todas las referencias se representa con la siguiente función

$$TC_{deseembalaje} = \sum_{i=1}^n \left(C_i^D \left\lceil d_i/Q_i - \left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor \right\rceil \right)$$

El inventario final por referencia equivale a

$$Inv_{final} = N_i + u_i - d_i$$

Por lo tanto, el costo total de inventario de todas las referencias es igual a

$$TC_{inventario} = \sum_{i=1}^n (C_i^H [N_i + u_i - d_i])$$

Como se mencionó anteriormente, los costos por adelanto/tardanza es la misma función presentada en el modelo anterior. En consecuencia, el costo total del sistema producción/empaque al adicionar los tres términos para este segundo modelo es

$$TC = TC_{deseembalaje} + TC_{inventario} + TC_{adelanto/tardanza}$$

$$TC = \sum_{i=1}^n \left(C_i^D \left\lceil d_i/Q_i - \left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor \right\rceil \right) + \sum_{i=1}^n (C_i^H [N_i + u_i - d_i]) + \sum_{h=1}^{H_i} \sum_{w \in W_{hi}} \sum_{i=1}^n (C_{hwi}^E \cdot E_{hwi} + C_{hwi}^T \cdot T_{hwi})$$

La función de impacto ambiental se representa con la misma función mostrada anteriormente. El modelo que determina la unidad de empaque robusta para minimizar el costo de desembalaje se presenta a continuación.

$$(1) \quad Min \text{ Costo} = \sum_{i=1}^n \left(C_i^D \left\lceil d_i/Q_i - \left\lfloor d_i/Q_i \right\rfloor \right\rceil \right) + \sum_{i=1}^n (C_i^H [N_i + u_i - d_i]) + \sum_{l=1}^n \sum_{w \in W_{hi}} \sum_{h=1}^{H_i} (C_{hwi}^E \cdot E_{hwi} + C_{hwi}^T \cdot T_{hwi})$$

$$(2) \quad \text{Min Impacto} = COE \left[\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{R_j} \left(t \int_{t=0}^t f_{(t)}^{kj} dt \right) \right]$$

Sujeto a:

$$(3) \quad b_{wij-1} + p_{ij-1} \leq b_{wij} \quad \forall w = 1, \dots, N_i; i = 1, \dots, n; j = 2, \dots, m-1$$

$$(4) \quad b_{wi,m-1} + p_{i,m-1} \leq b_{hwi} \quad \forall h = 1, \dots, H_i; w \in W_{hi}; i = 1, \dots, n$$

$$(5) \quad b_{wij} + p_{ij} + s_{iuj} - b_{vuj} \leq M \left[2 - \sum_{h=1}^{H_i} (X_{wilkjh} \cdot Y_{hwi}) - \sum_{h=1}^{H_i} (X_{vu,l+1,kjh} \cdot Y_{hvu}) \right]$$

$\forall i, u = 1, \dots, n; w = 1, \dots, N_i; v = 1, \dots, N_u; l < L; k = 1, \dots, R_j; j = 1, \dots, m-1; \text{ si } i = u$
 $\rightarrow w \neq v$

$$(6) \quad b_{hwi} + p_{im} \cdot Y_{hwi} + s_{ium} - b_{gvu} \leq M(2 - X_{wilkmh} - X_{vu,l+1,kmg}) \quad \forall i, u = 1, \dots, n; w \in W_{hi}; v \in V_{gi}; l < L; k = 1, \dots, R_m; h, g = 1, \dots, H_i; \text{ si } h = g \rightarrow w \neq v$$

$$(7) \quad \sum_{k=1}^{R_j} \sum_{l=1}^L \sum_{h=1}^{H_i} X_{wilkjh} \cdot Y_{hwi} = 1 \quad \forall w = 1, \dots, N_i; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m-1$$

$$(8) \quad \sum_{k=1}^{R_m} \sum_{l=1}^L X_{wilkmh} = 1 \quad \forall w \in W_{hi}; i = 1, \dots, n; h = 1, \dots, H_i$$

$$(9) \quad \sum_{i=1}^n \sum_{w=1}^{N_i} \sum_{h=1}^{H_i} X_{wilkjh} \cdot Y_{hwi} \leq 1 \quad \forall j = 1, \dots, m-1; k = 1, \dots, R_j; l = 1, \dots, L$$

$$(10) \quad \sum_{i=1}^n \sum_{w \in W_{hi}} \sum_{h=1}^{H_i} X_{wilkmh} \leq 1 \quad \forall k = 1, \dots, R_m; l = 1, \dots, L$$

$$(11) \quad b_{wij} \geq s_{0ij} \sum_{k=1}^{R_j} \sum_{h=1}^{H_i} X_{wi1kjh} \cdot Y_{hwi} \quad \forall i = 1, \dots, n; w = 1, \dots, N_i; j = 1, \dots, m-1$$

$$(12) \quad b_{hwi} \geq s_{0im} \sum_{k=1}^{R_m} X_{wi1kmh} \quad \forall i = 1, \dots, n; w \in W_{hi}; h = 1, \dots, H_i$$

$$(13) \quad \sum_{i=1}^n \sum_{w=1}^{N_i} \sum_{h=1}^{H_i} X_{wi,l+1,kjh} \cdot Y_{hwi} \leq \sum_{i=1}^n \sum_{w=1}^{N_i} \sum_{h=1}^{H_i} X_{wilkjh} \cdot Y_{hwi} \quad \forall j = 1, \dots, m-1; k = 1, \dots, R_j; l < L$$

$$(14) \quad \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^{H_i} X_{wi,l+1,kmh} \leq \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^{H_i} X_{wilkmh} \quad \forall w \in W_{hi}; k = 1, \dots, R_m; l < L$$

$$(15) \quad \sum_{h=1}^{H_i} X_{wilkjh} \cdot Y_{hwi} = 1 \quad \forall w = 1, \dots, N_i; i = 1, \dots, n; l = 1, \dots, L; k = 1, \dots, R_j; j = 1, \dots, m$$

$$\begin{aligned}
(16) \quad & \sum_{w=1}^{N_i} X_{wilkhj} \cdot Y_{hwi} = Q_i \quad \forall h = 1, \dots, H_i - 1; i = 1, \dots, n; l = 1, \dots, L; k = 1, \dots, R_j; j = 1, \dots, m \\
(17) \quad & \sum_{w=1}^{N_i} X_{wilkhj} \cdot Y_{hwi} = N_i - Q_i(H_i - 1) \quad \forall h = H_i; i = 1, \dots, n; l = 1, \dots, L; k = 1, \dots, R_j; j = 1, \dots, m \\
(18) \quad & Y_{hwi} \leq Q_i \quad \forall w = 1, \dots, N_i; i = 1, \dots, n; h = 1, \dots, H_i \\
(19) \quad & C_{hwi} \geq b_{hwi} + p_{im} \cdot Y_{hwi} \quad \forall w \in W_{hi}; i = 1, \dots, n; h = 1, \dots, H_i \\
(20) \quad & E_{hwi} \geq due_{hwi} - C_{hwi} \quad \forall w \in W_{hi}; i = 1, \dots, n; h = 1, \dots, H_i \\
(21) \quad & T_{hwi} \geq C_{hwi} - due_{hwi} \quad \forall w \in W_{hi}; i = 1, \dots, n; h = 1, \dots, H_i \\
(22) \quad & \tau \cdot \xi - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^{R_j} \sum_{l=1}^{L-1} (s_{iuj} \cdot X_{wilkhj} \cdot X_{vu,l+1,kjh}) \geq C_{hwi} \quad \forall w \in W_{hi}; v \in V_{gi}; i, u = 1, \dots, n; h = 1, \dots, H_i; si i = u \rightarrow w \neq v \\
(23) \quad & Z_i = N_i + u_i - d_i \quad \forall i = 1, \dots, n \\
(24) \quad & b_{wij}, b_{hwi}, Y_{hwi}, C_{hwi}, Z_i, E_{hwi}, T_{hwi}, Q_i \geq 0; \quad \forall w, i, h, j, \quad X_{wilkhj} \in \{0,1\}; \quad \forall w, i, l, k, j, h
\end{aligned}$$

Se ha modificado el balance de inventario (restricciones (23)) ya que, en este modelo, la cantidad a despachar por referencia equivale a la demanda.

3.3 Algoritmo Genético Híbrido (AGH)

La metodología propuesta para resolver el problema planteado se basa en un algoritmo genético híbrido (AGH). La literatura ha demostrado el buen desempeño de estos algoritmos en resolver problemas combinatorios en tiempos razonables. En esta sección se presentará el diseño del AGH para resolver cada uno de los modelos multi-objetivo, en donde el resultado será un frente de Pareto con las mejores soluciones encontradas de acuerdo con la demanda de todas las referencias. El pseudo-código de la estructura general del AGH se presenta a continuación.

Algoritmo 1 – Esquema General del Algoritmo Genético Híbrido

- 1: **Inicio**
- 2: Determinar el número de pedidos, demanda por referencia, tiempos de entrega y costos de adelanto/tardanza por pedido;
- 3: Seleccionar el número de iteraciones para buscar los mejores de tamaños de

Algoritmo 1 – Esquema General del Algoritmo Genético Híbrido

```
    empaque (iter_total) y el número de generaciones para hallar los programas de
    producción (max_gen);
4:   it = 1;
5:   Mientras que (it ≤ iter_total) haga
6:     Etapa I: Tamaños de empaque
        Determinar el tamaño de empaque, los tamaños de sub–lotes y asignar
        tiempos de entrega a los sub–lotes por referencia;
7:     Etapa II: Programación de producción
        Construir población inicial de programas de producción;
8:     gen = 1;
9:     Mientras que (gen ≤ max_gen) haga
10:      Calcular costo total, impacto ambiental y fitness para cada cromosoma de
        la población actual;
11:      Calcular población elitista con mejores programas de producción;
12:      Seleccionar cromosomas y aplicar los operadores de cruzamiento y
        mutación;
13:      Construir nueva generación de cromosomas;
14:      Fin
15:      Calcular población elitista con las mejores soluciones de tamaño de empaque
        y programas de producción;
16:      Fin
17: Fin
```

La estructura general del AGH se compone de dos etapas. En la etapa I, se determina un tamaño de empaque Q_i . Se calculan el número de empaques y los tamaños de los sub–lotes asociados a cada unidad de uso para cumplir con la demanda por referencia. Finalmente, se les asigna los tiempos de entrega. Con base en estos resultados, en la etapa II se buscan los mejores programas de producción mediante los operadores genéticos (selección, cruzamiento y mutación) y la evolución de cromosomas para generar nuevos individuos. Como se mencionó anteriormente, este algoritmo dará como resultado una frontera de Pareto con las mejores soluciones en términos de las dos funciones objetivo (costo total e impacto ambiental).

Para cada referencia, se determina el tamaño de empaque Q_i , el cual no debe superar al número de unidades de uso N_i . El número de empaques que se pueden conformar a partir de N_i y u_i es igual a:

$$H_i = \left\lceil \frac{N_i + u_i}{Q_i} \right\rceil$$

Si el cociente $\frac{N_i + u_i}{Q_i}$ es entero, se tendrán H_i empaques de tamaño Q_i ; de lo contrario, se tendrán $H_i - 1$ empaques de tamaño Q_i y un empaque igual a la mantisa de este cociente, es decir $Q_i \left(\frac{N_i + u_i}{Q_i} - \left\lfloor \frac{N_i + u_i}{Q_i} \right\rfloor \right)$.

Se diseñó una metodología que consta de dos fases para determinar los tamaños de los sub-lotes. En la primera, se calcula los tamaños de los sub-lotes Y_{whi} con base en los pedidos desconsolidados y los H_i empaques para cada referencia. El tamaño de sub-lote del pedido p del empaque k es igual a $\min\{\text{pedido}_p; \text{empaque}_k\}$. Además, se determina cuáles sub-lotes están asociados a cada pedido para asignar los tiempos de entrega. Un ejemplo de esta primera fase se muestra en la Figura 3-6, en donde se tienen cinco pedidos de una referencia particular, un inventario de $Z_i = 0.50$ y doce empaques de tamaño $Q_i = 0.50$ (en términos de unidad de uso).

Figura 3-6: Cálculo de tamaños de sub-lotes y asignación de tiempos de entrega con base en pedidos desconsolidados para una referencia



En la segunda, se asignan los sub-lotes a las unidades de uso. Dado que se pueden tener pedidos superiores a una unidad de uso, se debe ajustar los valores de Y_{whi} , ya que la suma de los tamaños de los sub-lotes asignados a una misma

unidad de uso no puede superar a uno (restricciones (15) de los modelos matemáticos). El tiempo de entrega para cada unidad de uso es el mínimo tiempo de entrega de los sub-lotes que le han sido asignados. El resultado de esta fase aplicado al ejemplo mostrado anteriormente se presenta en la Figura 3-7.

Figura 3-7: Cálculo de tamaños de sub-lotes con base en unidades de uso para una referencia

Unidad de uso 1	1	0,55	0,45																
Unidad de uso 2	1		0,10	0,50	0,35	0,05													
Unidad de uso 3	1			0,05	0,20	0,50	0,25												
Unidad de uso 4	1						0,30	0,55	0,15										
Qi		0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,15										

El pseudo-código de la estructura de esta metodología para calcular los tamaños de sub-lotes por referencia se presenta a continuación.

Algoritmo 3 – Cálculo de sub-lotes y asignación a unidades de uso y tiempos de entrega

- 1: **Inicio**
- 2: Fase I: Cálculo de tamaños de sub – lotes con base en pedidos desconsolidados
Sea *pedido* el vector de los *P* pedidos desconsolidados, *due* el vector de tiempos de entrega y *subpack* el vector de los *H* empaques de la referencia *i*;
- 3: Sea *Y'* la matriz de tamaños y *dsp* la matriz de tiempos de entrega de sub-lotes del pedido *p* del empaque *h*;
- 4: **Para** (*j* = 1: *P*: 1) **haga**
- 5: **Para** (*k* = 1: *H*: 1) **haga**
- 6: $Y'_{jk} = \min\{\text{pedido}_j; \text{subpack}_k\};$
- 7: $dsp_{jk} = \text{due}_j;$
- 8: $\text{pedido}_j = \text{pedido}_j - Y'_{jk};$
- 9: $\text{subpack}_k = \text{subpack}_k - Y'_{jk};$
- 10: **Fin**
- 11: **Fin**
- 12: Fase II: Asignación de sub-lotes a unidades de uso y tiempos de entrega
Sea *Y* la matriz de tamaños, *due^h* la matriz de tiempos de entrega de sub-lotes de la unidad de uso *w* del empaque *h* y *ddu* el vector de tiempos de entrega de las unidades de uso;
- 13: *k* = 1;
- 14: **Mientras que** (*k* ≤ *H*) **haga**
- 15: *j* = 1;

Algoritmo 3 – Cálculo de sub-lotes y asignación a unidades de uso y tiempos de entrega

```

16:   Mientras que ( $j \leq P$ ) haga
17:     Si ( $Y'_{jk} = 0$ ) haga
18:        $j = j + 1$ ;
19:     Sino
20:       Sea  $uso$  el vector de las  $U$  unidades de uso de la referencia  $i$ ;
21:        $w = 1$ ;
22:       Si ( $Y_{(uso_w)k} = 0$ ) haga
23:          $Y_{(uso_w)k} = \min\{Y'_{jk}; uso_w\}$ ;
24:          $Y'_{jk} = Y'_{jk} - Y_{(uso_w)k}$ ;
25:          $uso_w = uso_w - Y_{(uso_w)k}$ ;
26:          $due^h_{(uso_w)k} = dsp_{jk}$ ;
27:       Sino
28:          $w = w + 1$ ;
29:       Fin
30:     Fin
31:   Fin
32: Fin
33: Para ( $w = 1:U:1$ ) haga
34:    $ddu_w = \min\{due^h_{wk}\}$ ;
35: Fin
36: Fin

```

3.3.2 Etapa II: Programación de Producción

La estructura general del algoritmo en esta etapa para la búsqueda de los mejores programas de producción se presenta a continuación.

Algoritmo 4 – Etapa II: Programación de Producción

```

1: Inicio
2:   Determinar los parámetros del AGH:  $pop\_size$ , tamaño de la población inicial;
    $prob\_select$ , tasa de selección;  $prob\_cross$ , tasa de cruzamiento;  $prob\_mut$ , tasa
   de mutación;  $max\_gen$ , número máximo de generaciones;
3:   Construir la población inicial de tamaño  $pop\_size$  utilizando la meta heurística
   GRASP y una adaptación de la heurística de Radhakrishnan & Ventura (2000);
4:    $gen = 1$ ;
5:   Mientras que ( $gen \leq max\_gen$ ) haga
6:     Determinar el costo total y el impacto ambiental por cromosoma de la
     población actual y calcular su valor de fitness;

```

Algoritmo 4 – Etapa II: Programación de Producción

-
- 7: Actualizar la población elitista con base en una estrategia de dominancia débil;
 - 8: Seleccionar $pool_size$ cromosomas de la población actual para recombinar soluciones usando operadores genéticos (cruzamiento y mutación), donde $pool_size = pop_size \cdot prob_select$;
 - 9: Seleccionar $pool_size \cdot prob_cross$ pares de cromosomas y aplicar el operador de cruzamiento en ellos;
 - 10: Seleccionar $pool_size \cdot prob_mut$ cromosomas y aplicar el operador de mutación en ellos;
 - 11: Aplicar una estrategia de reemplazo para seleccionar los cromosomas que pasan a la siguiente generación;
 - 12: **Fin**
 - 13: **Fin**
-

Con las soluciones de la última población elitista se construye una frontera de Pareto con los mejores programas de producción de acuerdo con el número de unidades de uso N_i y el número de empaques H_i obtenidos en la etapa anterior.

▪ **Representación del programa de producción**

La representación de la solución corresponde a un vector de permutación de tamaño $\sum_i N_i + R_1 - 1$ con el orden en que el set de unidades de uso es procesado en la primera estación. Si esta estación tiene solo una máquina, la longitud del cromosoma es igual a $\sum_i N_i$. En caso contrario, el cromosoma está compuesto por el set de unidades de uso y $R_1 - 1$ símbolos de partición, en donde los números enteros representan la secuencia de producción y el número “0” determina la asignación de unidades de uso a las máquinas. En la Figura 3-8 se presenta un cromosoma para un problema con un set de 21 unidades de uso y 3 máquinas en la primera estación.

Figura 3-8: Ejemplo de cromosoma de programa de producción

6	5	13	0	11	10	21	18	12	14	15	17	16	7	8	0	9	2	4	1	3	19	20
---	---	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----

Este cromosoma indica que las secuencias y asignación de unidades de uso por máquina son:

Máquina 1: 6 – 5 – 13

Máquina 2: 11 – 10 – 21 – 18 – 12 – 14 – 15 – 17 – 16 – 7 – 8

Máquina 3: 9 – 2 – 4 – 1 – 3 – 19 – 20

Este vector por sí solo no representa la solución completa para todo el sistema. Por lo tanto, es necesario desarrollar un procedimiento para construir las secuencias de producción restantes y la asignación de unidades de uso a las máquinas de las siguientes estaciones. Este esquema de representación facilita la aplicación de los operadores de cruzamiento y mutación, por ende, mejora la eficiencia del algoritmo genético y el tiempo computacional.

▪ Población inicial de programas de producción

Construir una buena población inicial afecta la convergencia del AGH hacia mejores soluciones. Un enfoque para generar estos cromosomas es la asignación aleatoria de unidades de uso a las diferentes máquinas de la primera estación, garantizando factibilidad. Sin embargo, este esquema puede generar soluciones iniciales de baja calidad y aumentar el tiempo computacional del algoritmo. Por lo tanto, se propone la etapa constructiva de la meta–heurística GRASP basada en la búsqueda local de los mejores tiempos de alistamiento secuenciales dependientes (Díaz et al., 1996). El resultado de esta etapa será el ordenamiento de unidades de uso en la primera estación. A continuación, se presenta el pseudo–código de la etapa constructiva GRASP.

Algoritmo 5 – Etapa Constructiva GRASP

- 1: **Inicio**
- 2: $unidades = 0$;
- 3: Seleccionar el valor de α ;
- 4: **Mientras que** ($unidades \leq \sum_i N_i$) **haga**
- 5: Buscar el mínimo tiempo de alistamiento entre unidades de uso en la primera estación;
- 6: Calcular límites del intervalo del rango de búsqueda para construcción de LRC;
- 7: Construir LRC;

Algoritmo 5 – Etapa Constructiva GRASP

-
- 8: Seleccionar una unidad de uso de LRC con base en una función de densidad de una distribución de probabilidad uniforme discreta;
9: Ubicar trabajo en la sub-secuencia de producción correspondiente;
10: $unidades = unidades + 1$;
11: **Fin**
12: **Fin**
-

La etapa constructiva de GRASP genera una solución $U = (u_1, u_2, \dots, u_L)$ de forma iterativa, donde u_k representa una unidad de uso. En cada iteración se construye una lista restringida de candidatos (LRC) y cada elemento que se añade a la solución U se selecciona de este conjunto. El tamaño de LRC está restringido por aquellas unidades de uso cuyos tiempos de alistamiento se encuentran dentro de un rango, determinado por un valor de amplitud con respecto al mejor tiempo de alistamiento entre unidades de uso en la primera estación ($\min s_{iu1}$). Este rango se controla por medio del parámetro $\alpha \in [0,1]$, por ende, el rango de búsqueda para la construcción de LRC viene dado por aquellas unidades de uso cuyo tiempo de alistamiento se encuentra dentro del intervalo $[\min s_{iu1}, (1 + \alpha) \cdot \min s_{iu1}]$.

Un ejemplo del vector que se obtiene por medio de la meta-heurística GRASP se presenta en la Figura 3-9.

Figura 3-9: Ejemplo de cromosoma de programa de producción

6	5	13	11	10	21	18	12	14	15	17	16	7	8	9	2	4	1	3	19	20
---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	----	----

Una vez se construye el ordenamiento en la estación $j = 1$, el vector U se divide aleatoriamente para asignar las unidades de uso a los R_1 recursos para su procesamiento, como se muestra en la Figura 3-10.

Figura 3-10: Asignación aleatoria de unidades de uso a recursos de la primera estación

6	5	13	0	11	10	21	18	12	14	15	17	16	7	8	0	9	2	4	1	3	19	20
---	---	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----

Por medio de esta metodología se tiene un conjunto de pop_size cromosomas, sesgado a reducir los tiempos de alistamiento entre unidades de uso con base en la secuencia construida iterativamente.

▪ **Construcción de soluciones completas de programas de producción**

Como se mencionó anteriormente, es importante implementar una metodología apropiada para construir la solución completa de cada cromosoma de la población inicial. Se propone una adaptación de la heurística desarrollada por Radhakrishnan & Ventura (2000). La notación a utilizar se define, como sigue:

EC_{wkj}	tiempo de terminación más temprano del trabajo w en el recurso k en la estación j
NW_{kj}	número de trabajos asignados en recurso k en la estación j
$LAST_{kj}$	último trabajo procesado en el recurso k en la estación j
c_{wj}	tiempo de terminación del trabajo w en la estación j
s_{wuj}	tiempo de alistamiento entre trabajos w y u en la estación j
s_{0wj}	tiempo de alistamiento del trabajo w cuando es la primero de la secuencia en la estación j
p_{wj}	tiempo de procesamiento del trabajo w en la estación j
dd_w	tiempo de entrega del trabajo w

La idea básica de esta heurística es construir la secuencia de producción y asignar las unidades de uso a los recursos de las estaciones $j = 2, \dots, m - 1$, así como la secuencia de empaque y asignación de sub-lotes a los recursos de la estación j . El tiempo de terminación más cercano (EC_{wkj}) es calculado para todas las unidades de uso/sub-lote en todos los recursos $k \in R_j$ de la estación j con base su tiempo de entrega (dd_w) y la última unidad de uso/sub-lote asignada a cada recurso. Se selecciona la unidad de uso/sub-lote w^* con menor tiempo de terminación más cercano ($EC_{w^*k^*j}$) y se asigna al recurso correspondiente k^* . Este proceso se repite hasta que todas las unidades de uso/sub-lotes son asignadas a los recursos de la estación correspondiente.

El pseudo–código de la heurística para la construcción completa de la solución en las estaciones $j = 2, \dots, m$ se presenta a continuación.

Algoritmo 5 – Construcción de la población inicial

```

1: Inicio
2:    $j = 2$ ;
3:   Mientras que ( $j \leq m$ ) haga
4:     Sea  $LAST_{kj} = 0$  y  $\phi = \{1, \dots, \sum_i N_i\}$  el conjunto de las unidades de uso  $w$  no
       asignadas a algún recurso de la estación  $j$ ;
5:     Haga hasta ( $\phi = \{\emptyset\}$ )
6:       Para ( $w \in \phi$ ) haga
7:         Para ( $k \in R_j$ ) haga
8:           Si ( $NW_{kj} = 0$ ) haga
9:              $EC_{wkj} = \max\{c_{w,j-1} + s_{0wj} + p_{wj}; dd_w\}$ ;
10:            Sino
11:               $EC_{wkj} = \max\{\max\{c_{w,j-1}; c_{(LAST_{kj}),j} + s_{(LAST_{kj}),wj}\} + p_{wj}; dd_w\}$ ;
12:            Fin
13:          Fin
14:        Fin
15:        Calcular  $EC_{w^*k^*j} = \min\{EC_{wkj}\}$ . En caso de empate entre trabajos,
           seleccione el trabajo  $w^*$  con menor tiempo de terminación en la etapa
            $j - 1$ . En caso de empate entre máquinas para el trabajo  $w^*$ , seleccione
           el recurso  $k^*$  con menor  $s_{(LAST_{kj}),w^*j}$ ;
16:         $NW_{k^*j} = NW_{k^*j} + 1$ ;
17:         $LAST_{k^*j} = w^*$ ;
18:        Actualizar  $c_{(LAST_{k^*j}),j}$  a ser el tiempo de terminación del último trabajo
           asignados en el recurso  $k^*$  y retirar trabajo  $w^*$  del conjunto  $\phi$ ;
19:      Fin
20: Fin

```

Por medio de esta heurística, las unidades de uso/sub–lotes son asignadas a un recurso particular en cada estación. Se da prioridad a aquellas cuyos tiempos de entrega sean lo más cercanos respecto al tiempo de terminación de la última unidad procesada por cada recurso ($LAST_{kj}$). Si el tiempo de terminación de todo el programa de producción excede el tiempo activo disponible (τ, ξ), se reasignan las unidades de uso a los recursos de la primera estación.

- **Construcción de población elitista**

La población elitista está conformada por los mejores cromosomas de la población actual. Este subconjunto de individuos se construye por medio de una estrategia de dominancia débil. Sean $cromosoma_1$ y $cromosoma_2$ dos individuos de la población actual. Además, sean $costo_1, impacto_1, costo_2, impacto_2$ los valores de las funciones objetivos de los cromosomas, respectivamente. El $cromosoma_1$ domina al $cromosoma_2$ si ambos objetivos de $cromosoma_1$ son mejores que ambos objetivos de $cromosoma_2$ o $cromosoma_1$ es estrictamente mejor que $cromosoma_2$ en por lo menos un objetivo.

Esta población se va actualizando a medida que nuevos individuos se van creando por medio de los operadores genéticos en las siguientes generaciones. La población elitista de la última generación tendrá los mejores programas de producción con base en el número de unidades de uso y empaques obtenidos en la etapa I del AG.

- **Función de fitness**

Con el objetivo de emular la supervivencia de las mejores soluciones, un valor de fitness es asignado a cada cromosoma de la población actual para reflejar su nivel de superioridad relativa comparado con los demás individuos. Los cromosomas con menor valor de fitness implican mejores soluciones. Para este problema, se propone una función en donde se le asigne una valoración a cada objetivo del modelo, como se muestra a continuación:

$$Valor\ de\ fitness = 0.6 \times Costo\ total + 0.4 \times Impacto\ ambiental$$

- **Selección de cromosomas**

La selección de cromosomas para construir el subconjunto de individuos se realiza aleatoriamente pero sesgado a escoger los cromosomas con mejor valor

de fitness. Estos cromosomas tendrán mayor probabilidad de ser seleccionados para después aplicar los operadores genéticos. El subconjunto de individuos será de tamaño $pool_size = pop_size \cdot prob_select$.

Sea $cross_size$ el número de pares de cromosomas a cruzar y mut_size el número de cromosomas a mutar. Como se requieren dos cromosomas para aplicar el operador de cruzamiento, el subconjunto de individuos $pool_size$ se duplica a un set idéntico. Luego, se selecciona aleatoriamente un cromosoma padre de cada set y el segundo cromosoma se elimina del segundo set $pool_size$. Esta selección también está sesgada a escoger aquellos con mejor valor de fitness. Para el caso de la mutación, se seleccionan mut_size cromosomas del subconjunto de individuos aleatoriamente, pero también sesgado a escoger aquellos con mejor valor de fitness.

▪ Operador de cruzamiento

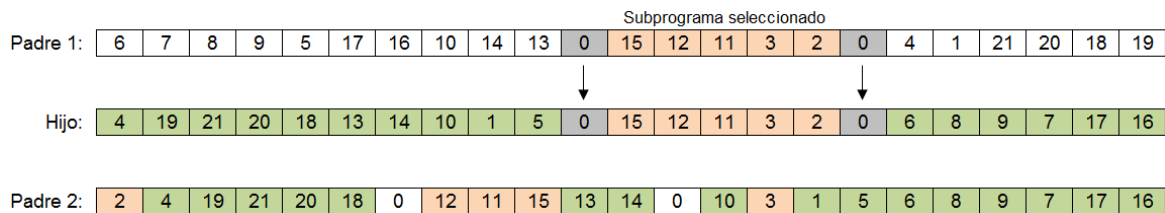
La operación de cruzamiento se utiliza para combinar información entre dos cromosomas padres seleccionados aleatoriamente del subconjunto de individuos con el objetivo de producir un mejor cromosoma hijo. Con base en la estructura propuesta del cromosoma, se ha utilizado el operador de cruzamiento de preservación de subprogramas, en donde un subprograma corresponde a la secuencia de producción de una máquina (Cheng & Gen, 1997). Este operador trabaja como sigue:

- Paso 1.* Seleccionar aleatoriamente un cromosoma (padre 1) y copiar los números “0” en las posiciones correspondientes.
- Paso 2.* Seleccionar aleatoriamente un subprograma de ese cromosoma padre y construir el cromosoma hijo copiando esta secuencia en las mismas posiciones correspondientes.
- Paso 3.* Seleccionar aleatoriamente otro cromosoma (padre 2) y ubicar las unidades de uso restantes haciendo un barrido de izquierda a derecha.
- Paso 4.* En caso de generar un cromosoma cuyo tiempo de terminación excede

el tiempo total activo disponible, modificar el cromosoma hijo reasignando unidades de uso a los recursos de la primera estación.

Un ejemplo de este operador se muestra en la Figura 3-11.

Figura 3-11: Operador de cruzamiento de preservación de subprogramas



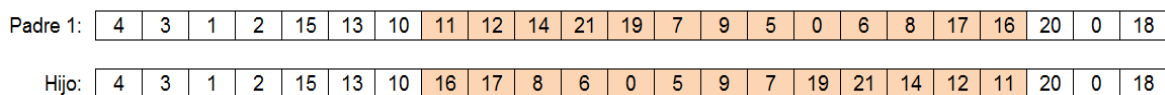
▪ Operador de mutación

La operación de mutación se utiliza para generar perturbaciones en los cromosomas de la población actual y crear diversificación en ella. En esta investigación se propone aplicar el operador de inversión, el cual trabaja como sigue:

- Paso 1.* Seleccionar aleatoriamente dos posiciones del cromosoma (padre 1).
- Paso 2.* Invertir el sub–vector entre estas dos posiciones para producir el cromosoma hijo.
- Paso 3.* En caso de generar un cromosoma cuyo tiempo de terminación excede el tiempo total activo disponible, modificar el cromosoma hijo reasignando unidades de uso a los recursos de la primera estación.

Un ejemplo de este operador se muestra en la Figura 3-12.

Figura 3-12: Operador de mutación de inversión



▪ Reemplazo de la población actual

Los cromosomas que pasan a la siguiente generación se seleccionan de la población actual y los nuevos individuos. Para mantener diversidad en las

siguientes generaciones, todos los cromosomas hijos que se crearon por medio de los operadores genéticos son seleccionados. Se completa la nueva población seleccionando los mejores cromosomas de la población con base en su valor de fitness hasta tener *pop_size* individuos.

4.Resultados de la Estrategia de Solución para la Planeación y Programación de la Producción basado en Sistemas Multiproducto–Multiempaque

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de diferentes pruebas experimentales para analizar el desempeño computacional de la metodología propuesta en términos de eficiencia y calidad de soluciones. Seguidamente, se mostrará una comparación de los resultados obtenidos por ambas estrategias de empaque.

4.1 Resultados Computacionales del AGH

Los parámetros utilizados en el AGH y el tamaño del problema afectan directamente a su desempeño en términos de eficiencia computacional y convergencia hacia a las mejores soluciones. El AGH fue codificado con MATLAB R2013a y todas las pruebas fueron realizadas en un computador con un procesador Intel Core i5 CPU 2.50 GHz con memoria RAM de 6 GB.

Se realizó un análisis con base en experimentos para evaluar el rendimiento del AGH y la calidad de las soluciones encontradas ante problemas de pequeño, mediano y gran tamaño. Cuatro tamaños diferentes de problemas, con 5 y 10 referencias, y 3 y 5 estaciones, fueron considerados. El número de recursos en paralelo en cada estación se establecieron entre dos y cinco, los cuales se muestran en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Estructura de problemas de prueba

Set	Número de referencias	Número de estaciones	Número de recursos por estación
1	5	3	3 – 4 – 5
2	5	5	3 – 4 – 2 – 5 – 3
3	10	3	3 – 4 – 5
4	10	5	3 – 4 – 2 – 5 – 3

Para analizar las dos estrategias de empaque se construyeron dos instancias generadas con base en la información suministrada por parte de una empresa del sector metalúrgico. No se encontraron instancias de prueba en la literatura en donde se considerara todos los aspectos incluidos en los dos modelos matemáticos. Se utilizaron las distribuciones mostradas en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Distribuciones para generación de instancias experimentales

Parámetro	Distribución
Número de pedidos	$U(2,6)$
Demanda por pedido	$U(500,4000)$
Tiempo de entrega por pedido	$U(10,400)$
Costo por adelanto/tardanza por pedido	$U(100,150)$
Costo por unidad perdida ($\$/und$)	$U(100,300)$
Costo de desembalaje ($\$/empaque$)	$U(100,300)$
Costo de inventario ($\$/und$)	$U(100,300)$
Tiempo de procesamiento p_{ij}	$U(3,25)$
Tiempo de alistamiento s_{0ij}	$U(1,15)$
Tiempo de alistamiento s_{iuj}	$U(1,20)$

En cada instancia se aseguró que los tiempos de alistamiento fueran a lo sumo el 25% del tiempo de procesamiento para cada referencia. Los valores de los parámetros de búsqueda para cada problema de prueba se presentan en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Valores de parámetros para pruebas experimentales

Set	Número de referencias	Número de estaciones	Tasa de cruzamiento	Tasa de mutación	Tasa de selección	Tamaño población inicial	Numero de generaciones	Número de iteraciones
1	5	3	0.30	0.10	0.40	50	10	10

Set	Número de referencias	Número de estaciones	Tasa de cruzamiento	Tasa de mutación	Tasa de selección	Tamaño población inicial	Numero de generaciones	Número de iteraciones
2	5	5	0.30	0.10	0.40	50	10	10
3	10	3	0.45	0.15	0.60	100	15	15
4	10	5	0.60	0.20	0.80	100	10	10

Cada problema de prueba se evaluó, resolviendo cada instancia cinco veces por estrategia de empaque. Para evaluar el desempeño del algoritmo ante las diferentes combinaciones por estrategia, es necesario mediciones cuantitativas que permitan comparar diferentes fronteras de Pareto. Se seleccionaron tres métricas usadas en la literatura para expresar la calidad de las soluciones no dominadas, las cuales son (Ballestín & Blanco, 2011):

- Distancia Media Ideal (DMI)

Uno de los métodos de comparación entre diferentes fronteras de Pareto es medir su distancia desde el set de soluciones óptimas. Sin embargo, este set no es conocido en casi todos los problemas multi-objetivo (como los dos modelos propuestos en esta investigación). Por lo tanto, se implementó la métrica modificada propuesta por Ebrahimi, Ghomi, & Karimi (2014). Los valores de las funciones objetivos de cada solución x de la frontera deben ser normalizados (por tener diferentes unidades), por medio de las siguientes expresiones:

$$f_{1x} = \frac{Costo(x) - \min(Costo)}{\max(Costo) - \min(Costo)} \quad f_{2x} = \frac{Impacto(x) - \min(Impacto)}{\max(Impacto) - \min(Impacto)}$$

Se toma el punto (0,0) como un punto de referencia y se calcula la distancia entre cada solución de la frontera y este punto. El promedio de estas distancias es el DMI, donde un menor valor de DMI indica una mejor frontera de Pareto. La expresión para calcular el DMI es igual a

$$DMI = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n}$$

Donde n es el número de soluciones de la frontera de Pareto, $D_i = \sqrt{f_{1i}^2 + f_{2i}^2}$ es la distancia entre la i -ésima solución y el punto ideal, y f_{1i} , f_{2i} son los valores normalizados de las funciones objetivos de la i -ésima solución.

- Número de soluciones del frente de Pareto (NSP)

Este criterio representa el número de soluciones no dominadas que resultan de la exploración del algoritmo con base en una combinación de parámetros. Este conjunto de soluciones son las opciones disponibles para al tomador de decisiones o usuario final. Por lo tanto, se prefiere que este conjunto sea lo más grande posible.

- Tiempo computacional (CPU)

Esta métrica representa el tiempo que requiere el algoritmo para obtener el frente de Pareto con base en la combinación de parámetros de búsqueda.

En resumen, se desea que el desempeño del algoritmo ante diferentes tamaños de problemas entregue como resultado una frontera de Pareto con menor valor DMI, mayor número de soluciones no dominadas y menor tiempo computacional. Para analizar el desempeño del AGH por estrategia de empaque, se calcularon las tres métricas mencionadas por réplica para cada problema de prueba por instancia resuelta. Los resultados por estrategia de empaque se muestran a continuación.

4.1.1 Resultados del AGH – Modelo 1

Los resultados obtenidos de las métricas DMI y NSP para los diferentes problemas de prueba al resolver el modelo 1 se presentan en las Figuras 4-1 y 4-2. Cada valor de las métricas representa el promedio de las diez corridas realizadas.

Figura 4-1: DMI para Modelo 1

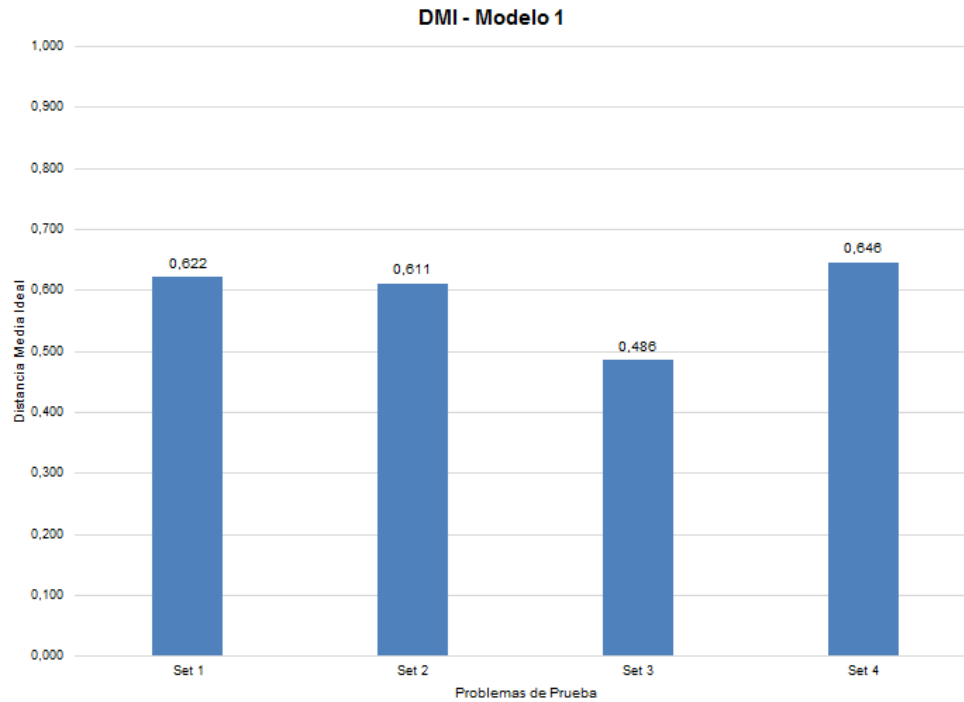
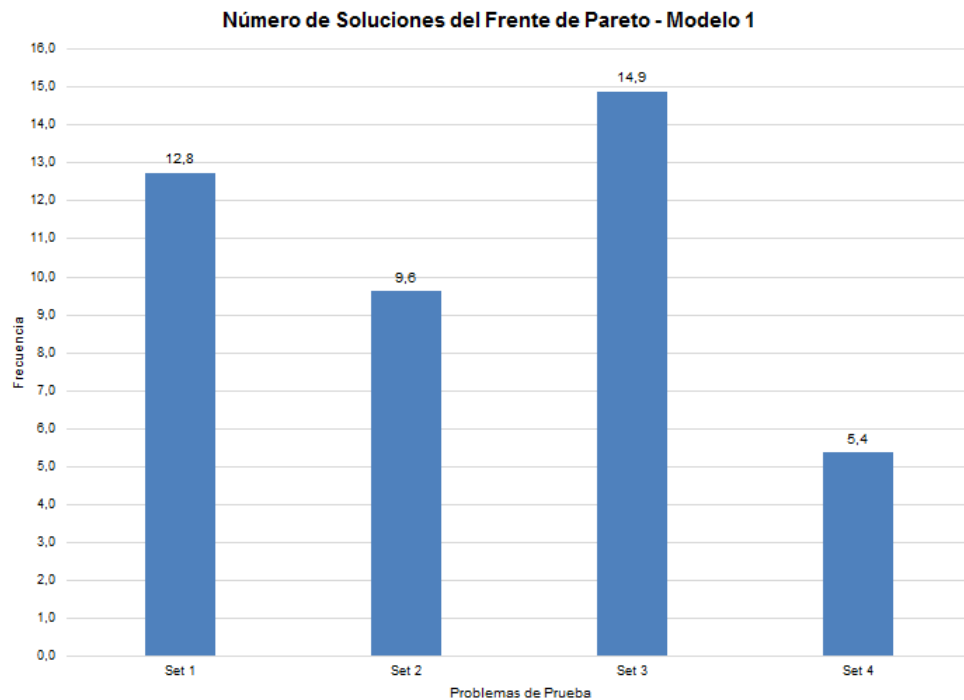


Figura 4-2: NPS para Modelo 1



En cuanto al desempeño del AGH para encontrar las mejores soluciones del modelo 1, se puede resaltar los siguientes aspectos. Para este modelo, las soluciones de mejor calidad se obtuvieron para el problema de prueba 3 (10 referencias y 3 estaciones), el cual es un problema de tamaño mediano. El DMI promedio para este problema es de 0.486. Se puede observar diferencias significativas en los valores de DMI con base en el tamaño del problema, en donde el mayor gap porcentual es de 33.03% (problema 4). A diferencia de los demás problemas, este set fue corrido con 15 iteraciones y generaciones para encontrar los mejores programas de producción. Esto indica que, para este modelo, estos parámetros son significativos en la calidad de las soluciones de la frontera de Pareto.

Así mismo, el mayor NSP se halló para el problema 3, cuyo promedio es de 14.9 soluciones. Respecto a esta métrica, también se observan diferencias significativas en el número de soluciones no dominadas respecto a los demás problemas. Por lo tanto, esta métrica también se ve afectada por los parámetros de iteraciones y generaciones en la búsqueda de mejores soluciones.

En la Tabla 4-4 y Tabla 4-5 se presentan los tiempos computacionales y número de empaques por referencia por cada problema de prueba.

Tabla 4-4: Tiempo CPU (segundos) y Número de Empaques – Problemas de 5 Referencias – Modelo 1

Problema $n \times m$	Empaques Ref. 1		Empaques Ref. 2		Empaques Ref. 3		Empaques Ref. 4		Empaques Ref. 5		Tiempo CPU Mínimo	Tiempo CPU Promedio	Tiempo CPU Máximo
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max			
5 x 3	3	112	4	143	3	188	4	200	4	500	36.49	117.12	315.82
5 x 5	3	167	4	137	3	250	4	273	4	250	41.95	85.23	125.38

Tabla 4-5: Tiempo CPU (segundos) y Número de Empaques – Problemas de 10 Referencias – Modelo 1

Problema $n \times m$	Empaques Ref. 1		Empaques Ref. 2		Empaques Ref. 3		Empaques Ref. 4		Empaques Ref. 5		Empaques Ref. 6		Empaques Ref. 7		Empaques Ref. 8		Empaques Ref. 9		Empaques Ref. 10		Tiempo CPU Min.	Tiempo CPU Prom.	Tiempo CPU Max.
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max			
10 x 3	4	334	3	273	4	150	4	53	3	250	4	167	4	177	3	75	3	231	3	429	1122.33	2077.76	3393.72
10 x 5	3	143	2	158	2	89	3	87	2	667	3	231	3	40	3	96	3	500	3	143	434.90	961.09	3228.45

Se observa como este tiempo aumenta cuando el problema crece, especialmente al agregar más referencias. También se puede apreciar que el tiempo computacional está afectado por el número de empaques que se deben conformar. Adicionalmente, se observa una gran diferencia en este tiempo para el problema 3, el cual se corrió con mayor número de iteraciones y generaciones. Estos parámetros de búsqueda aumentaron el tiempo para que el AGH hallara las mejores soluciones. En el caso de este modelo, el AGH es sensible al número de iteraciones y generaciones, y afecta directamente a las tres métricas de desempeño seleccionadas.

4.1.2 Resultados del AGH – Modelo 2

Los resultados obtenidos de las métricas DMI y NSP para los diferentes tamaños de problemas de prueba con base en el modelo 2 se presentan en las Figuras 4-3 y 4-4. Análogo al modelo 1, cada valor de las métricas representa el promedio de las diez corridas realizadas.

Figura 4-3: DMI para Modelo 2

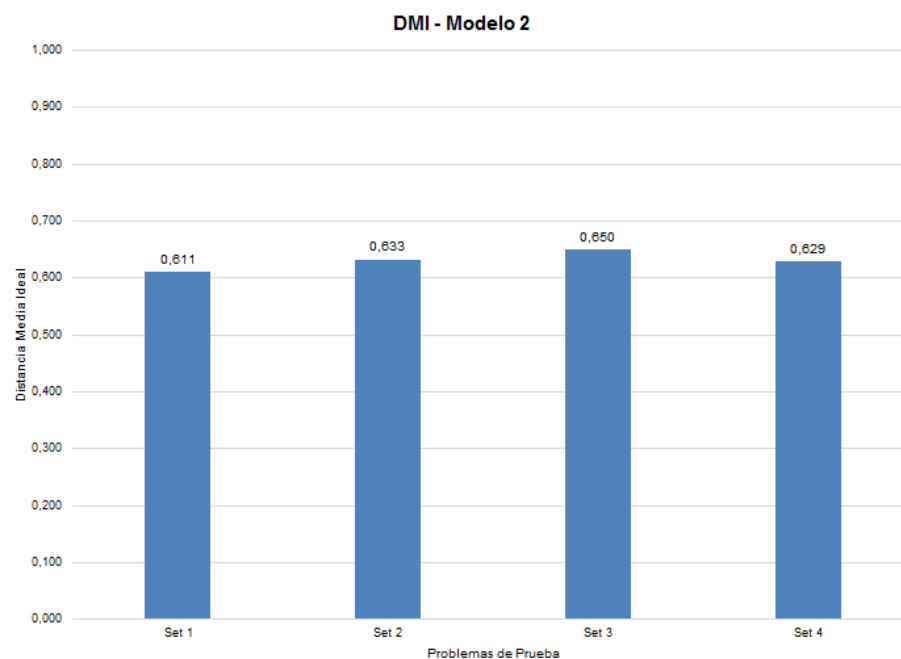
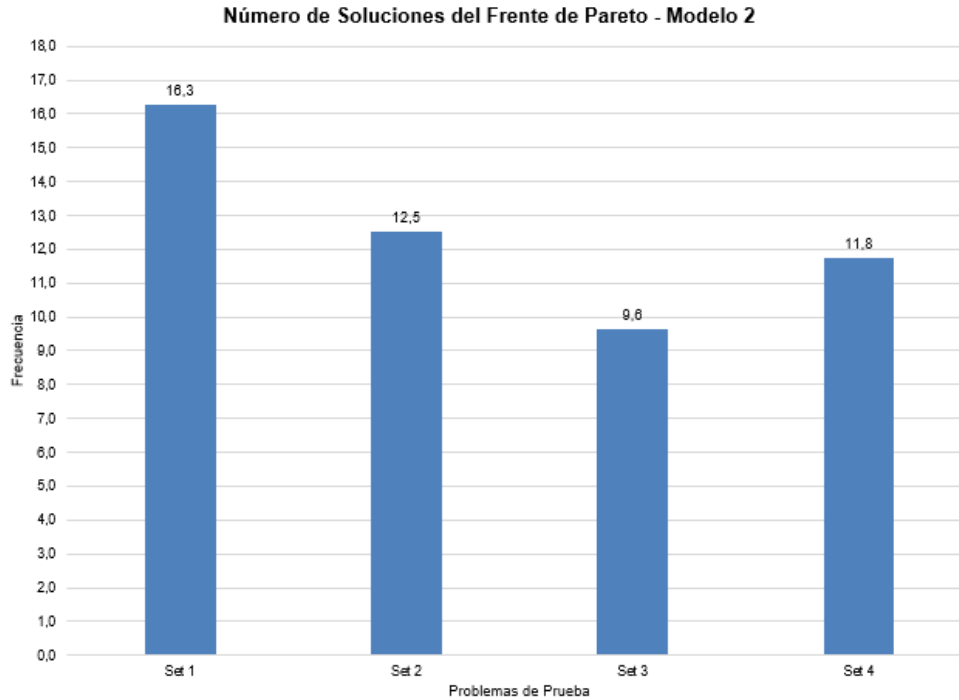


Figura 4-4: NPS para Modelo 2

Las siguientes observaciones pueden ser realizadas de acuerdo con los resultados. Las soluciones de mejor calidad se obtuvieron para el problema de prueba 1 (5 referencias y 3 estaciones), el cual se considera un problema pequeño. El DIM promedio para este problema es de 0.611. Sin embargo, los demás valores obtenidos difieren a lo sumo en un 6.33% del mejor DIM. Esto indica que la calidad de las soluciones de la frontera de Pareto no está afectada por el tamaño del problema ni por los parámetros de búsqueda. Por lo tanto, el AGH cuenta con capacidad para encontrar buenas soluciones, independientemente del tamaño del problema en cuanto al número de referencias y estaciones.

El mayor NSP se halló para el problema de prueba 1 (5 referencias y 3 estaciones), cuyo promedio es de 16.3 soluciones. Para este caso, se observa una disminución significativa en el valor NSP al aumentar el tamaño del problema. El mayor decremento en esta métrica se observó en el problema de prueba 3 (10 referencias y 3 estaciones), con una diferencia del 40.77%.

En la Tabla 4-6 y Tabla 4-7 se presentan los tiempos computacionales y numero de empaques por referencia por cada problema de prueba.

Tabla 4-6: Tiempo CPU (segundos) y Número de Empaques – Problemas de 5 Referencias – Modelo 2

Problema $n \times m$	Empaques Ref. 1		Empaques Ref. 2		Empaques Ref. 3		Empaques Ref. 4		Empaques Ref. 5		Tiempo CPU Mínimo	Tiempo CPU Promedio	Tiempo CPU Máximo
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max			
5 x 3	3	300	4	300	3	300	4	300	4	300	21.04	127.53	291.89
5 x 5	3	150	4	300	3	200	4	300	4	100	22.97	77.35	182.95

Tabla 4-7: Tiempo CPU (segundos) y Número de Empaques – Problemas de 10 Referencias – Modelo 2

Problema $n \times m$	Empaques Ref. 1		Empaques Ref. 2		Empaques Ref. 3		Empaques Ref. 4		Empaques Ref. 5		Empaques Ref. 6		Empaques Ref. 7		Empaques Ref. 8		Empaques Ref. 9		Empaques Ref. 10		Tiempo CPU Min.	Tiempo CPU Prom.	Tiempo CPU Max.
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max			
10x3	4	400	3	300	4	400	4	200	3	200	4	250	4	150	3	223	3	200	3	500	132.60	1520.89	2221.25
10x5	4	400	3	300	1	118	4	100	3	667	4	250	4	200	3	134	3	200	3	200	630.75	1356.04	2857.51

Se observa como este tiempo aumenta a medida que el problema crece, especialmente al agregar referencias ya que implica programar más unidades de uso y, por lo tanto, más empaques. Además, el tiempo que toma el AGH para encontrar las mejores soluciones están fuertemente afectado por el número de empaques a conforman en la última estación. Un ejemplo es el tiempo promedio del problema de prueba 1 (127.53 segundos) comparado con el problema de prueba 2 (77.35 segundos). El número máximo de empaques que en promedio se conformaron de más en el problema de prueba 1 comparado al problema 2 es de 90. Esta diferencia conllevó a que el AGH tomara más tiempo en encontrar los mejores programas de producción/conformación de empaques, a pesar de tener dos estaciones menos.

Así mismo se puede observar en el caso de los problemas de prueba de 10 referencias. Al comparar el tiempo computacional promedio del problema 3 (1520.89 segundos) con el tiempo del problema 4 (1356.04 segundos), se puede ver una diferencia del 12.2% por tener un mayor número de empaques en la mayoría de las corridas realizadas.

4.2 Comparación de Estrategias de Empaque

Para realizar una comparación entre estrategias de empaque, se seleccionaron los problemas de prueba 1 y 3 para analizar el efecto en costo e impacto ambiental al agregar más referencias al sistema producción/empaque. En cada uno se consideró un horizonte de planeación de seis periodos ($t = 6$) con el fin de observar el cambio en el tamaño de empaque para cada referencia por periodo dado el inventario de producto terminado y la demanda.

Para el problema de 5 referencias se corrieron varias pruebas experimentales con el fin de analizar las dos estrategias de empaque a lo largo del horizonte de planeación. Desde la Figura 4-5 hasta la Figura 4-10 se muestran los resultados obtenidos para una corrida experimental.

Figura 4-5: Frontera de Pareto de una corrida de 5 referencias para Tiempo 1

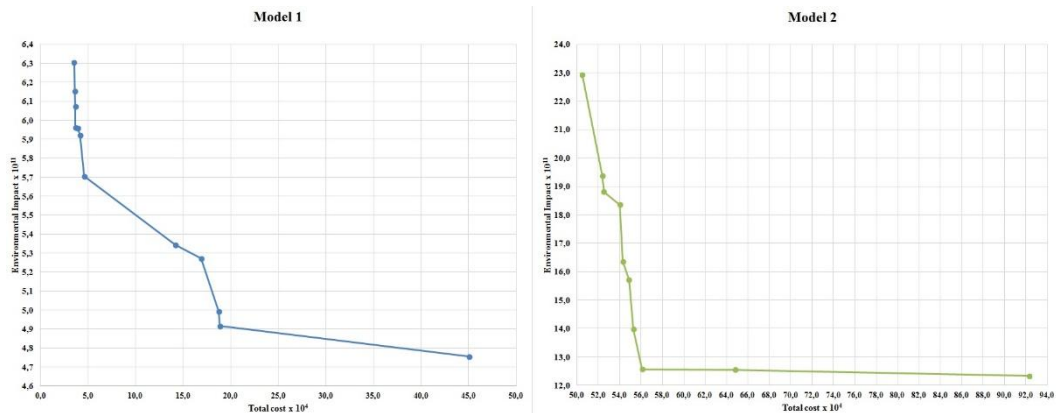


Figura 4-6: Frontera de Pareto de una corrida de 5 referencias para Tiempo 2

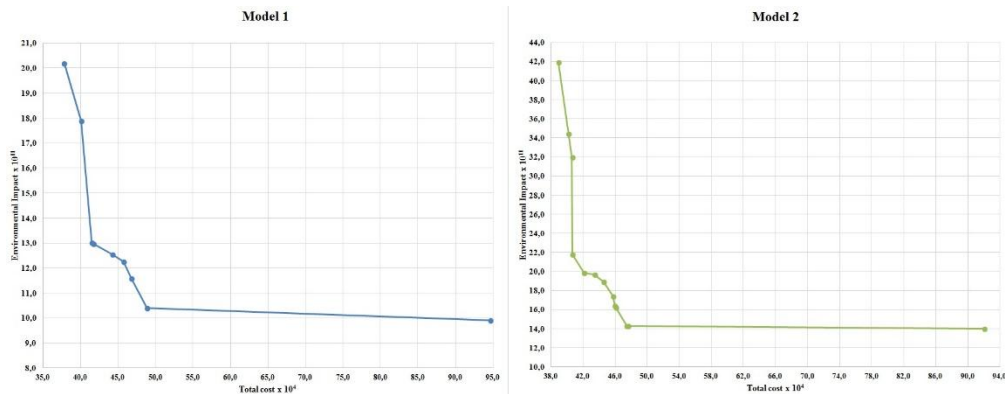


Figura 4-7: Frontera de Pareto de una corrida de 5 referencias para Tiempo 3

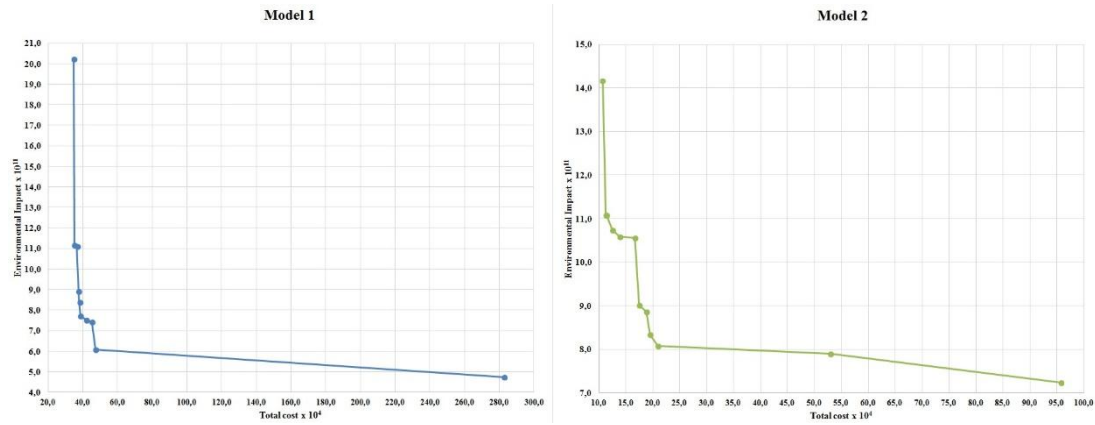


Figura 4-8: Frontera de Pareto de una corrida de 5 referencias para Tiempo 4

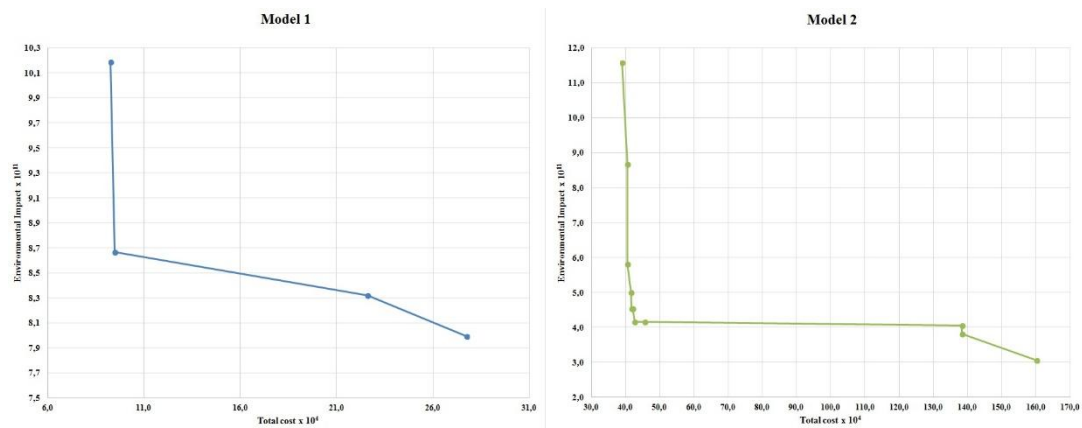


Figura 4-9: Frontera de Pareto de una corrida de 5 referencias para Tiempo 5

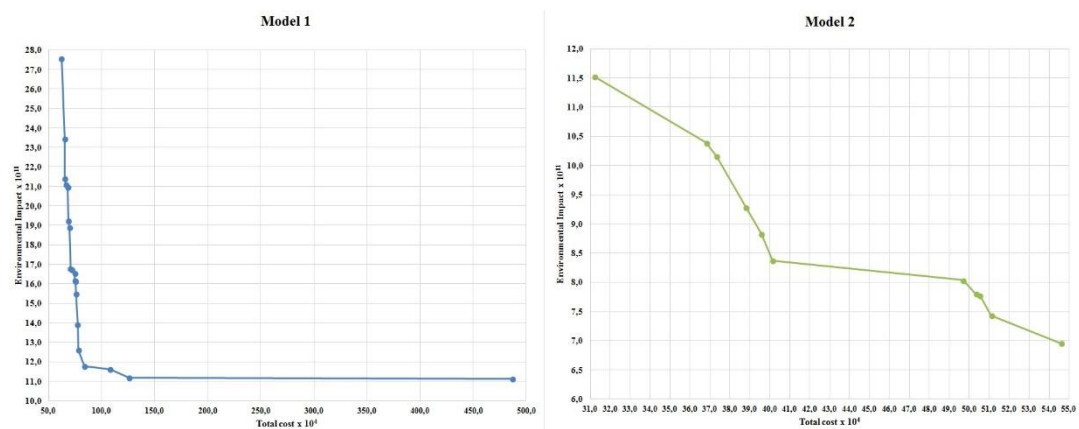
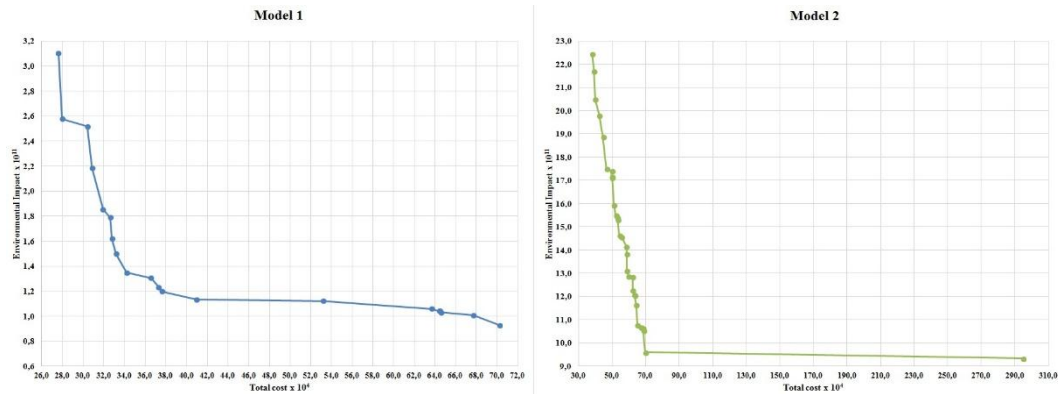


Figura 4-10: Frontera de Pareto de una corrida de 5 referencias para Tiempo 6

Para comparar las dos estrategias de empaque por periodo y en todo el horizonte de planeación, se utilizaron las métricas NSP y DMI. Los resultados promedio para el problema de 5 referencias se presentan en la Tabla 4-8.

Tabla 4-8: Métricas de Desempeño NSP y DMI – Problema de 5 Referencias

Estrategia	Promedio Métricas de Desempeño Normalizadas												Promedio Global	
	Periodo 1		Periodo 2		Periodo 3		Periodo 4		Periodo 5		Periodo 6			
	NSP	DMI	NSP	DMI	NSP	DMI	NSP	DMI	NSP	DMI	NSP	DMI	NPS	DMI
Modelo 1	12	0.6984	9	0.8637	10	0.3986	4	0.7610	20	0.4327	20	0.5971	13	0.6253
Modelo 2	10	0.5255	13	0.3934	12	0.4983	11	0.4991	11	0.7768	31	0.4471	15	0.5234

El modelo 2 entrega un menor valor de la métrica DMI en la mayoría de tiempos del horizonte de planeación, es decir, un mejor balance entre el costo total y el impacto ambiental. Se puede observar una diferencia significativa en el periodo 2, en donde se tiene un gap del 119.55% favoreciendo al modelo 2. En general, el modelo 2 entregó mejores resultados que el modelo 1. La diferencia porcentual del valor de DMI, en promedio, para todo el horizonte de planeación es de 19.47%.

Análogamente, para el problema de 10 referencias, se corrieron varias pruebas con el objetivo de comparar el desempeño de las dos estrategias de empaque a lo largo del horizonte de planeación. Desde la Figura 4-11 hasta la Figura 4-16 se muestran los resultados obtenidos para una corrida experimental.

Figura 4-11: Frontera de Pareto de una corrida de 10 referencias para Tiempo 1

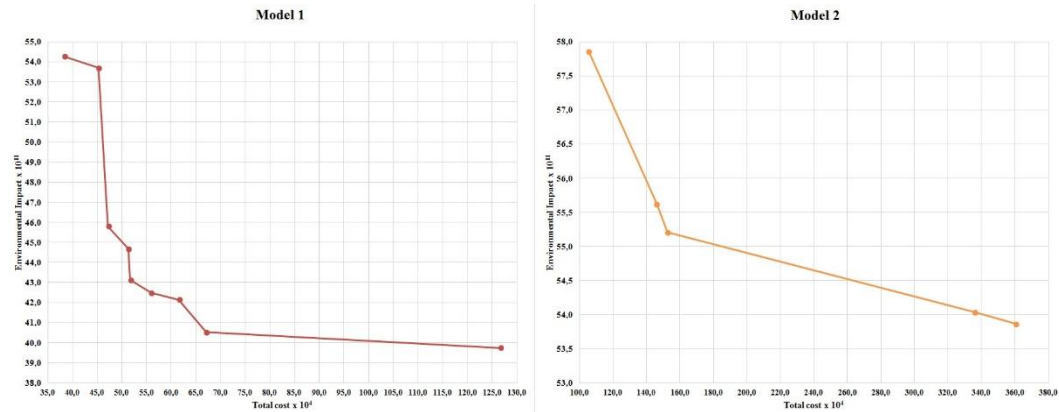


Figura 4-12: Frontera de Pareto de una corrida de 10 referencias para Tiempo 2

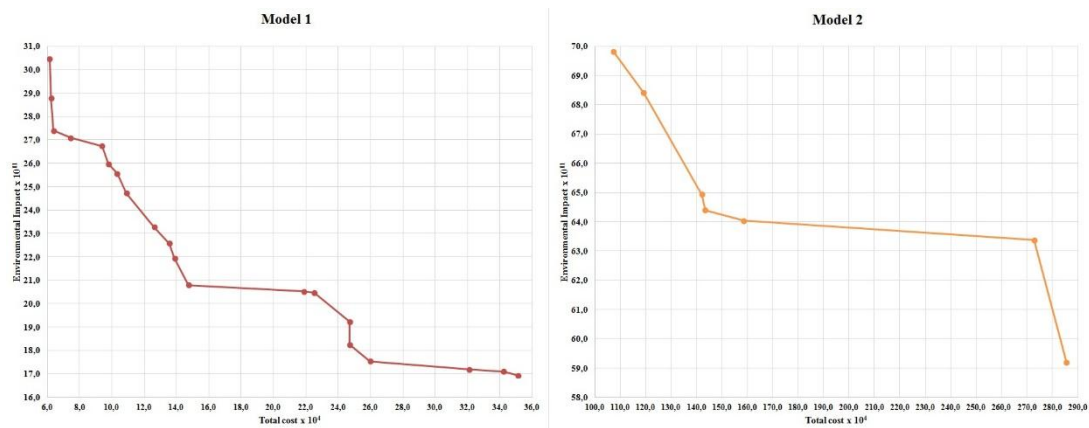


Figura 4-13: Frontera de Pareto de una corrida de 10 referencias para Tiempo 3

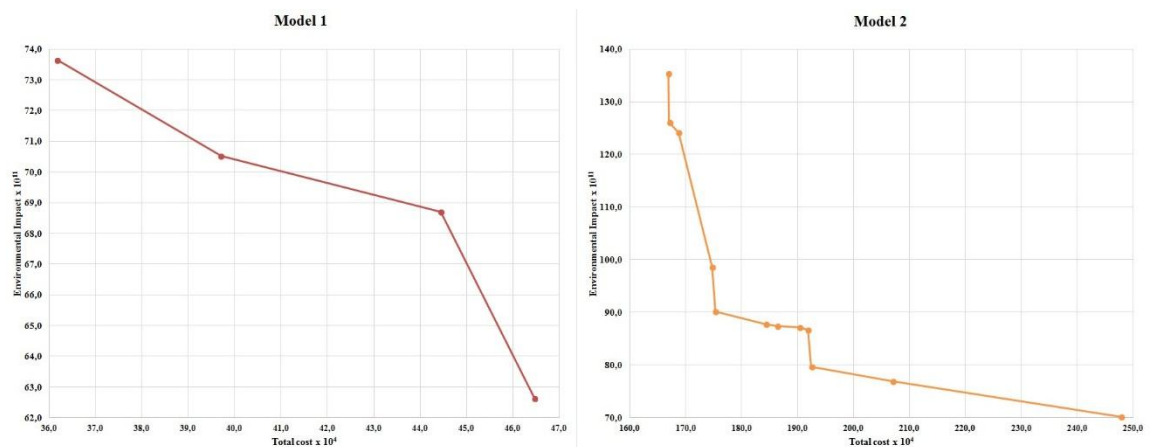


Figura 4-14: Frontera de Pareto de una corrida de 10 referencias para Tiempo 4

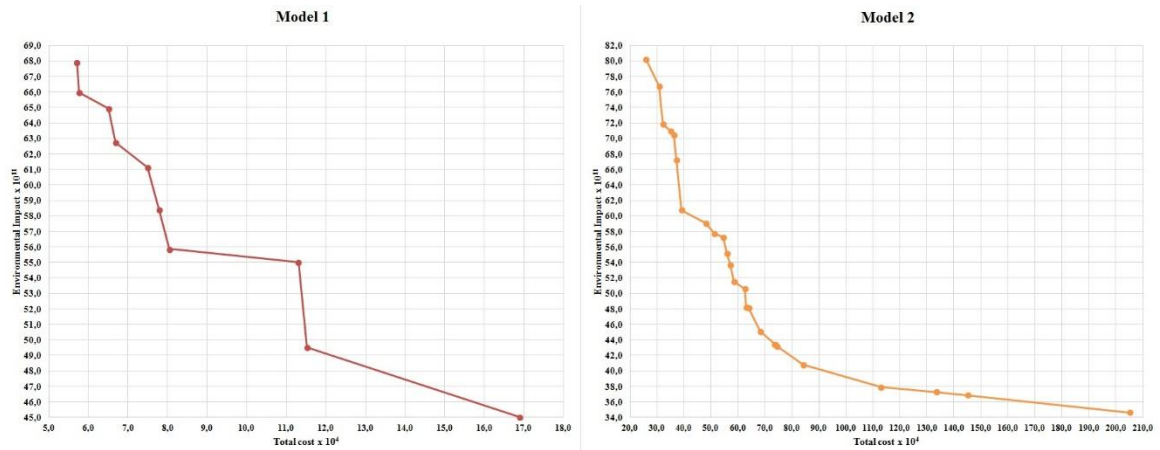


Figura 4-15: Frontera de Pareto de una corrida de 10 referencias para Tiempo 5

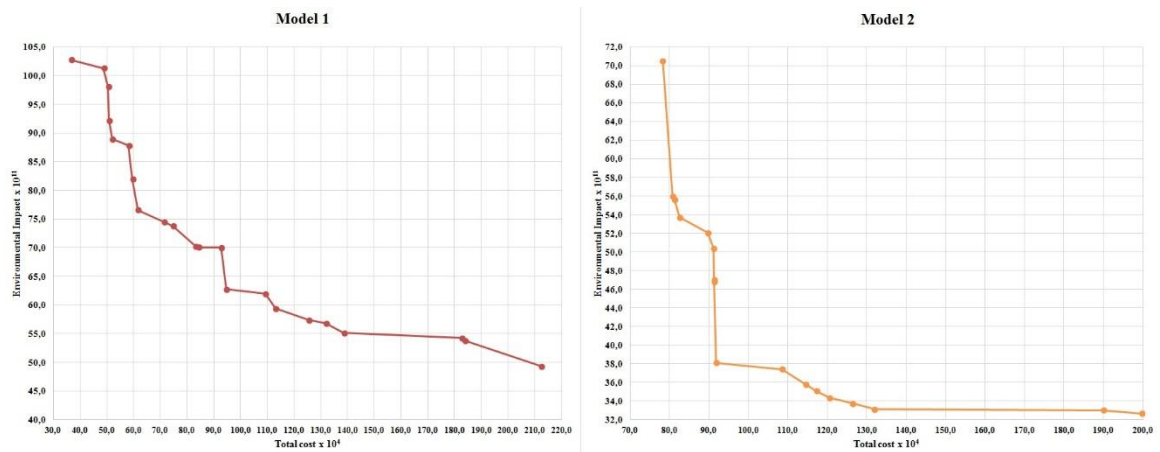
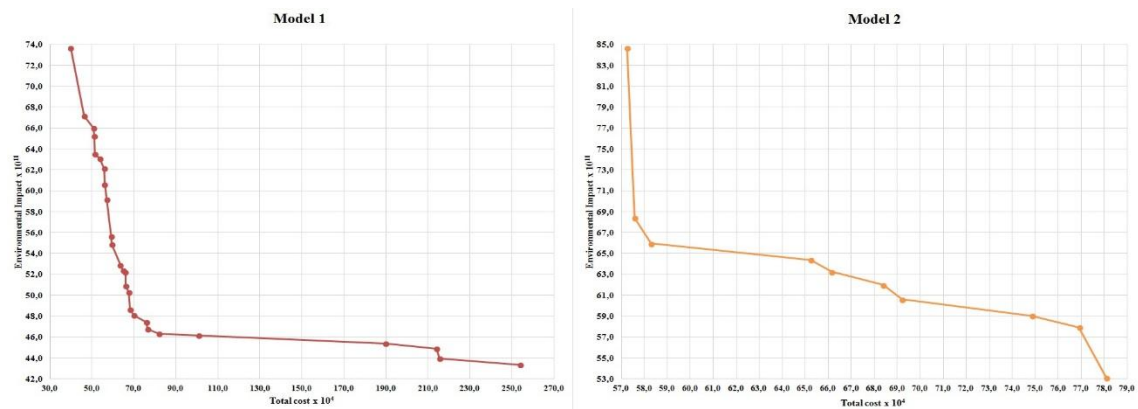


Figura 4-16: Frontera de Pareto de una corrida de 10 referencias para Tiempo 6



Los resultados promedio para el problema de 10 referencias se presentan en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9: Métricas de Desempeño NSP y DMI – Problema de 10 Referencias

Estrategia	Promedio Métricas de Desempeño Normalizadas												Promedio Global	
	Periodo 1		Periodo 2		Periodo 3		Periodo 4		Periodo 5		Periodo 6			
	NSP	DMI	NSP	DMI	NSP	DMI	NSP	DMI	NSP	DMI	NSP	DMI	NPS	DMI
Modelo 1	9	0.5504	20	0.7016	4	0.9423	10	0.7642	22	0.6598	26	0.5127	15	0.6885
Modelo 2	5	0.7508	7	0.7892	12	0.5669	25	0.5656	17	0.5165	10	0.7001	13	0.6482

Para el problema de 10 referencias, se observa que el modelo 2 entrega un menor valor de la métrica DMI en la mayoría de tiempos del horizonte de planeación. En este caso, las diferencias entre valores de DMI son menores, en donde la mayor corresponde a un 66.22% (periodo 3). El modelo 2 entregó mejores resultados que el modelo 1, con una diferencia de tan solo un 6.22%, en promedio, para todo el horizonte de planeación. En general, el modelo 2 presentó un mejor desempeño en términos de calidad de las soluciones para ambos problemas (5 y 10 referencias).

5. Conclusiones

La programación de la producción en sistemas multi-producto es uno de los problemas de mayor complejidad tanto en la literatura como en el ámbito industrial. La multiplicidad de referencias conlleva a la implementación de herramientas robustas para determinar la secuenciación de referencias a fabricar con el objetivo de minimizar los alistamientos y la utilización de energía. Además, la falta de sincronización entre las etapas de producción y empaque implica altos costos de inventario o pérdida de producto terminado, mala utilización del espacio para almacenamiento de materia prima y producto empackado y sobrecostos de producción.

Santander-Mercado y Jubiz-Díaz (2016) realizaron una exhaustiva revisión del estado del arte de las metodologías y complejidades que se han desarrollado para resolver el Problema de Programación del Lote Económico (ELSP). La literatura muestra que el tamaño de empaque por referencia no ha sido considerado en la programación de sistemas multi-producto. La utilización de energía por la operación de los recursos y alistamientos tampoco ha sido incluida en las propuestas de solución del ELSP. Además, los trabajos de investigación se han concentrado en desarrollar modelos mono-objetivos (98% de los artículos encontrados) y las metodologías de solución que más se han implementado para resolver este problema en sistemas de múltiples instalaciones son las heurísticas.

Esta investigación presenta dos modelos multi-objetivo en donde se integró el sistema de producción con el sistema de empaque para evaluar dos estrategias de estandarización de tamaño de empaque por referencia: minimización de costo de pérdida de producto terminado y minimización de costo de desembalaje. Adicionalmente, en ambos modelos se minimiza el costo de utilización de

energía, costos de inventario, costo por adelanto/tardanza e impacto ambiental. Debido a la no linealidad de los modelos por las funciones parte entera y argumento mínimo, se desarrolló un algoritmo genético híbrido compuesto por dos etapas para encontrar las mejores soluciones de tamaño de empaque y programación de programación para la demanda por referencia. En la primera etapa se calculan las unidades de uso, se determina el tamaño de empaque por referencia y mediante una heurística se calcula los tamaños de los sub-lotes de empaque. En la segunda etapa se buscan los mejores programas de producción con base en los resultados de la etapa anterior.

Los resultados de este algoritmo genético muestran que el desempeño del AGH difiere en relación a los dos modelos presentados. Cabe resaltar la falta de instancias de prueba en la literatura con las cuales se evalúe el desempeño del algoritmo propuesto. En el caso del modelo para minimización de costo de unidades perdidas, el AGH se ve afectado por los parámetros de búsqueda (iteraciones y generaciones) en cuando a la calidad de las soluciones y el tiempo computacional. En cuanto al modelo para minimización de costo de desembalaje, las métricas de desempeño no difieren respecto a los parámetros de búsqueda y tamaño del problema. La comparación de estrategias de empaque en términos de las métricas seleccionadas concluye que la estrategia de minimización de costo de desembalaje entrega un mejor balance entre ambas funciones objetivo (costo total e impacto ambiental). Se realizaron varias corridas de ambos modelos a lo largo de un horizonte de planeación de 6 periodos y los resultados mostraron que la segunda estrategia es superior a la primera.

Futuras líneas de investigación se pueden considerar dada las diferentes brechas que surgen a partir de este trabajo al presentar los primeros modelos que integren las decisiones de producción y empaque. La literatura muestra que la mayoría de los trabajos relacionados con el problema ELSP consideran problemas mono-objetivo. Esto es una barrera para la implementación de dichas propuestas a situaciones reales de la industria ya que las organizaciones no solo buscan minimizar costo total del sistema productivo. Por lo tanto, futuros trabajos deben

incluir problemas multi-objetivo relacionados con ventas perdidas, retornos, recursos no idénticos, faltantes, especialmente en entornos de producción de múltiples máquinas. En relación con el problema de empaque, futuras investigaciones pueden incluir la evaluación de una estrategia de empaque flexible, en donde analice el impacto de tener diferentes tipos de empaque por referencia.

En cuanto a las metodologías, futuros trabajos deben estar orientados al diseño de algoritmos robustos para resolver problemas de mediano y gran tamaño. El desarrollo de heurísticas y meta-heurísticas está todavía en curso, tanto para sistema de producción de una y múltiples máquinas. Los algoritmos genéticos han sido ampliamente utilizados para resolver diferentes versiones del problema clásico de programación de operaciones y problema ELSP. Sin embargo, aún no está claro cuál metodología es la más prometedora, teniendo en cuenta entornos de producción más realistas. Futuros trabajos deben considerar el desarrollo de métodos híbridos, especialmente para este nuevo problema, los cuales han mostrado un buen desempeño en el problema ELSP.

A. Anexo: Función objetivo y características en investigaciones de ELSP en una sola máquina

Autor(es)	Función Objetivo					Características y Restricciones																							
	Carga de Trabajo	Costo	Beneficio	Inventario	Makespan	Backorders	Buffers	Capacidad Fija	Capacidad Insuficiente	Coproducción	Costos Difusos	Demanda Determinística	Demanda Difusa	Disponibilidad de Recursos	Fallas	Grupos de Trabajo	Materia Prima	Presupuesto	Rendimiento	Retornos	Tamaño de Lote Variable	Tasa de Producción Variable	Alistamientos Dependientes	Alistamientos Independientes	Tiempos de Entrega	Tiempo Ocioso	Valor del Dinero en Tiempo	Ventas Perdidas	Vida Útil de Trabajos
Krone (1964)		X				X						X																	
Maxwell (1964)		X										X											X						
Bomberger (1966)		X										X												X					
Madigan (1968)		X										X												X					
Stankard and Gupta (1969)		X										X												X					
Elmaghraby, Mallik and Nuttle (1970)		X										X												X					
Hodgson (1970)		X										X												X					
Doll and Whybark (1973)		X										X												X					
Goyal (1973)		X										X																	
Haessler and Hogue (1976)		X										X												X					
Delporte and Thomas (1977)		X										X											X			X			
Fujita (1978)		X										X												X					
Haessler (1979)		X										X												X					
Park and Yun (1984)		X										X												X					
Hodgson and Nuttle (1986)		X										X												X					

Autor(es)	Función Objetivo					Características y Restricciones																							
	Carga de Trabajo	Costo	Beneficio	Inventario	Makespan	Backorders	Buffers	Capacidad Fija	Capacidad Insuficiente	Coproducción	Costos Difusos	Demanda Determinística	Demanda Difusa	Disponibilidad de Recursos	Fallas	Grupos de Trabajo	Materia Prima	Presupuesto	Rendimiento	Retornos	Tamaño de Lote Variable	Tasa de Producción Variable	Alistamientos Dependientes	Alistamientos Independientes	Tiempos de Entrega	Tiempo Ocioso	Valor del Dinero en Tiempo	Ventas Perdidas	Vida Útil de Trabajos
Dobson (1987)		X										X									X			X					
Boctor (1988)		X										X												X					
Gallego and Roundy (1988)		X				X						X												X		X			
Geng and Vickson (1988)		X										X												X					
Larrañeta and Onieva (1988)		X										X												X					
Lee and Danusaputro (1989)		X										X												X					
Philipoom, Rees and Taylor (1989)		X										X												X					
Kuo and Inman (1990)		X										X				X							X			X			
Dobson (1992)		X										X											X						
Gallego and Joneja (1994)		X										X					X							X					
Davis (1995)		X										X												X					
Don Taylor, Taha and Chowning (1997)		X										X											X						
Elhafsi and Bai (1997)		X				X						X										X		X					
Grznar and Riggle (1997)		X										X												X					
Khouja (1997)		X										X										X		X					
Gonçalves and Leachman (1998)		X										X												X					
Khouja, Michalewicz and Wilmot (1998)		X										X												X					
Moon and Christy (1998)		X										X										X		X		X			
Moon, Hahm and Lee (1998)		X										X							X					X					
Segerstedt (1999)		X						X				X												X		X			
Ben-Daya and Hariga (2000)		X										X								X				X					
Khoury, Abboud and Tannous (2001)		X							X			X																	
Oh and Karimi (2001)		X										X											X						
Yao (2001)	X											X												X					

Autor(es)	Función Objetivo					Características y Restricciones																								
	Carga de Trabajo	Costo	Beneficio	Inventario	Makespan	Backorders	Buffers	Capacidad Fija	Capacidad Insuficiente	Coproducción	Costos Difusos	Demanda Determinística	Demanda Difusa	Disponibilidad de Recursos	Fallas	Grupos de Trabajo	Materia Prima	Presupuesto	Rendimiento	Retornos	Tamaño de Lote Variable	Tasa de Producción Variable	Alistamientos Dependientes	Alistamientos Independientes	Tiempos de Entrega	Tiempo Ocioso	Valor del Dinero en Tiempo	Ventas Perdidas	Vida Útil de Trabajos	
Yao and Elmaghraby (2001)		X										X												X						
Moon, Giri and Choi (2002)		X										X								X	X			X						
Moon, Silver and Choi (2002)		X										X												X						
Sarker and Newton (2002)		X										X					X													
Wagner and Davis (2002)		X										X											X							
Giri, Moon and Yun (2003)		X										X								X	X			X						
Alle, Pinto and Papageorgiou (2004)		X										X							X				X							
Cooke, Rohleder and Silver (2004)		X										X												X						
Faaland, Schmitt and Arreola-Risa (2004)			X									X												X				X		
Giri and Moon (2004b)		X						X				X						X			X			X						
Giri and Moon (2004a)		X										X									X	X		X		X				
Soman, Van Donk and Gaalman (2004)		X										X												X					X	
Raza and Akgunduz (2005)		X										X									X			X						
Yao (2005)		X										X												X						
Yao and Huang (2005)		X										X												X						X
Chang, Yao, Huang and Chen (2006)		X											X											X						
Moon, Cha and Bae (2006)		X										X				X							X							
Raza, Akgunduz and Chen (2006)		X										X									X			X		X				
Tang and Teunter (2006)		X										X								X				X						
Chandrasekaran, Rajendran, Chetty and Hanumanna (2007)		X										X									X		X	X		X				
Chatfield (2007)		X						X				X												X						
Levén and Segerstedt (2007)		X										X												X						
Liu, Wu and Zhou (2008)		X										X												X						X
Peixin and Guijie (2008)		X										X												X						

[illegible]

Autor(es)	Función Objetivo					Características y Restricciones																							
	Carga de Trabajo	Costo	Beneficio	Inventario	Makespan	Backorders	Buffers	Capacidad Fija	Capacidad Insuficiente	Coproductión	Costos Difusos	Demanda Determinística	Demanda Difusa	Disponibilidad de Recursos	Fallas	Grupos de Trabajo	Materia Prima	Presupuesto	Rendimiento	Retornos	Tamaño de Lote Variable	Tasa de Producción Variable	Alistamientos Dependientes	Alistamientos Independientes	Tiempos de Entrega	Tiempo Ocioso	Valor del Dinero en Tiempo	Ventas Perdidas	Vida Útil de Trabajos
Tasgetiren, Bulut and Fadiloglu (2012)		X										X												X					
Vidal-Carreras, Garcia-Sabater and Coronado-Hernandez (2012)		X								X		X												X					
Zanoni, Segerstedt, Tang and Mazzoldi (2012)		X										X								X				X					
Adelman and Barz (2013)		X										X											X						
Adil, Ali, Husaan and Raza (2013)		X										X												X					
Ganguly, Chowdhury, Mukherjee, Suganthan, Das and Chua (2013)		X										X									X			X					
HasanAdil, Ali, Husaan and Raza (2013)		X										X												X					
Holmbom, Segerstedt and van der Sluis (2013)		X										X												X					
Capa, Akgunduz and Demirli (2014)		X			X							X												X					
Adelman and Barz (2014)		X										X											X						
Bulut and Tasgetiren (2014a)		X										X								X				X					
Bulut and Tasgetiren (2014b)		X										X												X					
Luo, Xie, Xiao and Zou (2014)		X										X												X					
Mohammadi, Musa, Bahreininejad (2014)		X				X						X												X					X
Chang, Chen and Wong (2015)		X										X										X		X		X			
Mohammadi, Musa and Bahreininejad (2015)		X				X						X												X					X

B. Anexo: Investigaciones de ELSP en máquinas en paralelo

Autor(es)	Características y Restricciones								Método de Solución						
	Backorders	Costos Dependientes de la Máquina	Demanda Constante / Determinística	Máquinas Idénticas	Máquinas No Idénticas	Tamaño de Lote Variable	Tiempos de Alistamientos Dependientes	Tiempos de Alistamientos Independientes	Ventas Perdidas	Algoritmo Búsqueda Local	Algoritmo Genético / Evolutivo	Algoritmo Búsqueda Binaria	Heurística / Algoritmo	Programación Entera	Programación Lineal
Carreno (1990)			X	X				X					X		
Bollapragada y Rao (1999)					X		X		X				X		X
Pesenti y Ukovich (2003a)			X	X					X				X		
Chang y Yao (2008b)			X	X				X			X	X	X		
Sun, Huang y Jaruphongsa (2009b)			X	X				X			X				
Chang y Yao (2010)			X	X		X		X			X		X		
Haksoz y Pinedo (2011)		X	X		X			X	X				X		X
Bollapragada, Della Croce y Ghirardi (2011)	X	X	X		X		X		X				X		
Chan, Chung y Chan (2012)			X		X		X				X			X	

C. Anexo: Investigaciones de ELSP en líneas de producción continuas

Autor(es)	Características y Restricciones				Método de Solución			
	Demanda Determinística	Alistamientos Dependientes (Línea)	Alistamientos Dependientes (Secuencia)	Alistamientos Independientes	Algoritmo Genético / Evolutivo	Heurística / Algoritmo	Programación Entera Mixta	Programación No Lineal
Ouenniche y Boctor (2001a)	X	X				X		
Ouenniche y Boctor (2001b)	X	X				X		
Ouenniche y Boctor (2001)	X	X				X		
Boctor y Poulin (2005)	X			X		X		
Huang y Yao (2006)	X	X				X		
Huang y Yao (2007)	X	X				X		
Huang y Yao (2008)	X	X			X			
Heydari, Karimi y Torabi (2009)	X	X	X		X		X	

D. Anexo: Investigaciones de ELSP en líneas de producción continuas flexibles

Autor (es)	Características y Restricciones							Método de Solución					
	Buffers	Demanda Constante / Determinística	División de Lotes	Máquinas Idénticas	Máquinas No Idénticas	Tiempos de Alistamientos Dependientes (Estación)	Tiempos de Alistamientos Dependientes (Máquina)	Algoritmo Búsqueda Tabú	Algoritmo Genético / Evolutivo	Heurística	Programación Entera Mixta	Programación No Lineal	Recocido Simulado
S.A. Torabi, S.M.T. Fatemi Ghomi y B. Karimi (2005)		X	X	X		X				X		X	
B. Akrami, B. Karimi y S.M. Moattar Hosseini (2006)	X	X		X		X		X	X		X		
M. Jenabi, S.M.T. Fatemi Ghomi, S.A. Torabi y B. Karimi (2007)	X	X		X	X	X	X		X			X	X

Bibliografía

- Adelman, D., & Barz, C. (2013). A unifying approximate dynamic programming model for the economic lot scheduling problem. *Mathematics of Operations Research*, 39(2), 374-402.
- Adelman, D., & Barz, C. (2014). A price-directed heuristic for the economic lot scheduling problem. *IIE Transactions*, 46(12), 1343-1356.
- Adil, S. H., Ali, S. S. A., Hussaan, A., & Raza, K. (2013). Hybridization of Multiple Intelligent Schemes to Solve Economic Lot Scheduling Problem Using Basic Period Approach. *Life Sci J*, 10(2), 2992-3005.
- Akrami, B., Karimi, B., & Hosseini, S. M. (2006). Two metaheuristic methods for the common cycle economic lot sizing and scheduling in flexible flow shops with limited intermediate buffers: The finite horizon case. *Applied Mathematics and Computation*, 183(1), 634-645.
- Akrami, B., Karimi, B., & Moattar Hosseini, S. M. (2006). Two metaheuristic methods for the common cycle economic lot sizing and scheduling in flexible flow shops with limited intermediate buffers: The finite horizon case. *Applied Mathematics and Computation*, 183(1), 634-645.
- Alle, A., Pinto, J. M., & Papageorgiou, L. G. (2004). The economic lot scheduling problem under performance decay. *Industrial & engineering chemistry research*, 43(20), 6463-6475.
- Ballestín, F., & Blanco, R. (2011). Theoretical and practical fundamentals for multi-objective optimisation in resource-constrained project scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 38(1), 51-62.
- Ben-Daya, M., & Hariga, M. (2000). Economic lot scheduling problem with imperfect production processes. *Journal of the Operational Research Society*, 51(7), 875-881.

- Boctor, F. F. (1988). A more efficient formulation of the single machine, static demand, lot scheduling problem. *Engineering costs and production economics*, 14(1), 3-10.
- Boctor, F. F., & Poulin, P. (2005). Heuristics for the N-product, M-stage, economic lot sizing and scheduling problem with dynamic demand. *International Journal of Production Research*, 43(13), 2809-2828.
- Boctor*, F. F., & Poulin, P. (2005). Heuristics for the N-product, M-stage, economic lot sizing and scheduling problem with dynamic demand. *International journal of production research*, 43(13), 2809-2828.
- Bollapragada, R., Della Croce, F., & Ghirardi, M. (2011). Discrete-time, economic lot scheduling problem on multiple, non-identical production lines. *European Journal of Operational Research*, 215(1), 89-96.
- Bollapragada, R., Ghirardi, M., & Croce, F. D. (2011). Discrete-time, economic lot scheduling problem on multiple, non-identical production lines. *European Journal of Operational Research*, 215(1), 89-96.
- Bollapragada, R., & Rao, U. (1999). Single-Stage Resource Allocation and Economic Lot Scheduling on Multiple, Nonidentical Production Lines. *Management Science*, 45(6), 889-904.
- Bomberger, E. E. (1966). A dynamic programming approach to a lot size scheduling problem. *Management science*, 12(11), 778-784.
- Bourland, K. E., & Yano, C. A. (1997). A comparison of solution approaches for the fixed-sequence economic lot scheduling problem. *IIE Transactions*, 29(2), 103-108.
- Brander, P., & Segerstedt, A. (2009). Economic lot scheduling problems incorporating a cost of using the production facility. *International Journal of Production Research*, 47(13), 3611-3624.
- Bulut, O., & Tasgetiren, M. F. (2014a). *A discrete artificial bee colony algorithm for the Economic Lot Scheduling problem with returns*. Paper presented at the Evolutionary Computation (CEC), 2014 IEEE Congress on.

- Bulut, O., & Tasgetiren, M. F. (2014b). An artificial bee colony algorithm for the economic lot scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 52(4), 1150-1170.
- Bulut, O., Tasgetiren, M. F., & Fadiloglu, M. M. (2012). A genetic algorithm for the economic lot scheduling problem under extended basic period approach and power-of-two policy *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence* (pp. 57-65): Springer.
- Capa, C., Akgunduz, A., & Demirli, K. (2014). *A bi-objective genetic algorithm for economic lot scheduling problem under uncertainty*. Paper presented at the IIE Annual Conference. Proceedings.
- Carreno, J. J. (1990). Economic lot scheduling for multiple products on parallel identical processors. *Management Science*, 36(3), 348-358.
- Chan, H. K., & Chung, S. H. (2010). *Genetic approach to solve economic lot-scheduling problem*. Paper presented at the Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology.
- Chan, H. K., Chung, S. H., & Chan, T. M. (2012). Combining genetic approach and integer programming to solve multi-facility economic lot-scheduling problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(6), 2397-2405.
- Chandrasekaran, C., Rajendran, C., Krishnaiah Chetty, O., & Hanumanna, D. (2007). Metaheuristics for solving economic lot scheduling problems (ELSP) using time-varying lot-sizes approach. *European Journal of Industrial Engineering*, 1(2), 152-181.
- Chang, P.-T., Yao, M.-J., Huang, S.-F., & Chen, C.-T. (2006). A genetic algorithm for solving a fuzzy economic lot-size scheduling problem. *International Journal of Production Economics*, 102(2), 265-288.
- Chang, Y.-J., Chen, S.-C., & Hsu, P.-Y. (2011). *A search algorithm for solving the economic lot scheduling problem with returns under the basic period approach*. Paper presented at the Management and Service Science (MASS), 2011 International Conference on.

- Chang, Y.-J., Chen, Y., & Wong, H.-L. (2015). Using the Simple Fixed Rate Approach to Solve Economic Lot Scheduling Problem under the Basic Period Approach. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Social, Behavioral, Educational, Economic and Management Engineering*, 9(7), 2154-2162.
- Chang, Y.-J., & Yao, M.-J. (2008a). Solving the economic lot scheduling problem with identical facilities in parallel using genetic algorithms. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 25(2), 91-104.
- Chang, Y.-J., & Yao, M.-J. (2008b). Solving the economic lot scheduling problem with identical facilities in parallel using genetic algorithms. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 25(2), 91-104.
- Chang, Y.-J., & Yao, M.-J. (2009). A genetic algorithm for solving the economic lot scheduling problem with reworks. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 26(5), 411-425.
- Chang, Y.-J., & Yao, M.-J. (2010). Solving the economic lot scheduling problem with multiple facilities in parallel using the time-varying lot sizes approach. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 31(4), 809-835.
- Chang, Y.-J., & Yao, M.-J. (2011). New heuristics for solving the economic lot scheduling problem with reworks. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 7(1), 229.
- Chatfield, D. C. (2007). The economic lot scheduling problem: A pure genetic search approach. *Computers & Operations Research*, 34(10), 2865-2881.
- Cheng, R., & Gen, M. (1997). Parallel machine scheduling problems using memetic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, 33(3), 761-764.
- Chung, S. H., & Chan, H. K. (2012). A two-level genetic algorithm to determine production frequencies for economic lot scheduling problem. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 59(1), 611-619.
- Cooke, D. L., Rohleder, T. R., & Silver, E. A. (2004). Finding effective schedules for the economic lot scheduling problem: A simple mixed integer

- programming approach. *International Journal of Production Research*, 42(1), 21-36.
- Crespo Franco, T., & García Vázquez, J. M. (1996). Sistemas de Planificación y Control de la Fabricación: Análisis Comparativo. 2(1), 101-124.
- Davis, S. (1995). An improved algorithm for solving the economic lot size problem (ELSP). *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 33(4), 1007-1026.
- Delporte, C. M., & Thomas, L. J. (1977). Lot sizing and sequencing for N products on one facility. *Management Science*, 23(10), 1070-1079.
- Dobson, G. (1987). The economic lot-scheduling problem: achieving feasibility using time-varying lot sizes. *Operations research*, 35(5), 764-771.
- Dobson, G. (1992). The cyclic lot scheduling problem with sequence-dependent setups. *Operations Research*, 40(4), 736-749.
- Doll, C. L., & Whybark, D. C. (1973). An iterative procedure for the single-machine multi-product lot scheduling problem. *Management Science*, 20(1), 50-55.
- Don taylor, G., Taha, H. A., & Chowning, K. M. (1997). A heuristic model for the sequence-dependent lot scheduling problem. *Production Planning & Control*, 8(3), 213-225.
- Drexl, A., & Kimms, A. (1997). Lot sizing and scheduling - Survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, 88(2), 221-235.
- Díaz, A. C., Glover, F., Ghaziri, H. M., González, J. L., Laguna, M., Moscato, P., & Tseng, F. T. (1996). *Optimización Heurística y Redes Neuronales en Dirección de Operaciones e Ingeniería*. Madrid: Paraninfo.
- Ebrahimi, M., Ghomi, S. F., & Karimi, B. (2014). Hybrid flow shop scheduling with sequence dependent family setup time and uncertain due dates. *Applied Mathematical Modelling*, 38(9), 2490-2504.
- Elhafsi, M., & Bai, S. X. (1997). The common cycle economic lot scheduling problem with backorders: benefits of controllable production rates. *Journal of Global Optimization*, 10(3), 283-303.

- Elmaghraby, S. E. (1978). The economic lot scheduling problem (ELSP): review and extensions. *Management Science*, 24(6), 587-598.
- Elmaghraby, S. E., Mallik, A. K., & Nuttle, H. L. (1970). The scheduling of lots on a single facility. *AIIE Transactions*, 2(3), 203-213.
- Faaland, B. H., Schmitt, T. G., & Arreola-Risa, A. (2004). Economic lot scheduling with lost sales and setup times. *IIE Transactions*, 36(7), 629-640.
- Fujita, S. (1978). The application of marginal analysis to the economic lot scheduling problem. *AIIE Transactions*, 10(4), 354-361.
- Gallego, G., & Joneja, D. (1994). Economic lot scheduling problem with raw material considerations. *Operations Research*, 42(1), 92-101.
- Gallego, G., & Roundy, R. (1988). *The extended economic lot scheduling problem*. Retrieved from
- Gallego, G., & Xiao Shaw, D. (1997). Complexity of the ELSP with general cyclic schedules. *IIE Transactions*, 26(2), 109-113.
- Ganguly, S., Chowdhury, A., Mukherjee, S., Suganthan, P. N., Das, S., & Chua, T. J. (2013). A Hybrid Discrete Differential Evolution Algorithm for Economic Lot Scheduling Problem with Time Variant Lot Sizing *Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications* (pp. 1-12): Springer.
- García, J., & Prado, J. (2006). La mejora de la eficacia en la cadena de suministro mediante el adecuado diseño de envases y embalajes. *Universia Business Review*, 10, 80-95.
- Garey, M., Johnson, D., & Sethi, R. (1976). The Complexity of Flowshop and Jobshop Scheduling. *Mathematics of Operations Research*, 1(2), 117-129.
- Generalitat Valenciana. (2009). Huella de carbono en el CEACV Retrieved from <http://www.magrama.gob.es/>
- Geng, P., & Vickson, R. (1988). Two heuristics for the economic lot scheduling problem: an experimental study. *Naval Research Logistics (NRL)*, 35(4), 605-617.

- Giri, B., & Moon, I. (2004a). Accounting for idle capacity cost in the scheduling of economic lot sizes. *International journal of production research*, 42(4), 677-691.
- Giri, B., & Moon, I. (2004b). Note on an economic lot scheduling problem under budgetary and capacity constraints. *International Journal of Production Economics*, 91(3), 229-234.
- Giri, B., Moon, I., & Yun, W. (2003). Scheduling economic lot sizes in deteriorating production systems. *Naval Research Logistics (NRL)*, 50(6), 650-661.
- González Fernández, M. Á. (2011). *Soluciones Metaheurísticas al "Job-Shop Scheduling Problem with Sequence-Dependent Setup Times"*. Retrieved from España:
- Gonçalves, J., & Leachman, R. C. (1998). A hybrid heuristic and linear programming approach to multi-product machine scheduling. *European journal of operational research*, 110(3), 548-563.
- Gonçalves, J. F., & Sousa, P. S. (2011). A genetic algorithm for lot sizing and scheduling under capacity constraints and allowing backorders. *International Journal of Production Research*, 49(9), 2683-2703.
- Goyal, S. (1973). Scheduling a multi-product single machine system. *Journal of the Operational Research Society*, 24(2), 261-269.
- Grznar, J., & Riggle, C. (1997). An optimal algorithm for the basic period approach to the economic lot scheduling problem. *Omega*, 25(3), 355-364.
- Gámez Albán, H., Soto Cardona, O., Mejía Argueta, C., & Sarmiento, A. (2015). A cost-efficient method to optimize package size in emerging markets. *European Journal of Operational Research*, 241, 917-926.
- Haessler, R. W. (1979). An improved extended basic period procedure for solving the economic lot scheduling problem. *AIIE transactions*, 11(4), 336-340.
- Haessler, R. W., & Hogue, S. L. (1976). Note-A Note on the Single-Machine Multi-Product Lot Scheduling Problem. *Management Science*, 22(8), 909-912.
- Haksöz, Ç., & Pinedo, M. (2011). Economic lot scheduling with resources in parallel. *International Journal of Production Research*, 49(9), 2625-2641.

- HasanAdil, S., Ali, S. S. A., Hussaan, A., & Raza, K. (2013). Solution of Economic Lot Scheduling Problem: A Hybrid Meta-Heuristic Approach. *Life Science Journal*, 10(3).
- Hernández, J. O., Hernández, S., & Flores, I. (2011). Algoritmo recocido simulado para el problema de la programación del tamaño del lote económico bajo el enfoque de ciclo básico. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 19(3), 473-485.
- Heydari, M., Karimi, B., & Torabi, S. A. (2009). The Economic Lot Scheduling Problem in Flow Lines with Sequence-Dependent Setups. *International Journal of Industrial Engineering. & Production Research*, 20(1-2), 1-10.
- Heydari, M., & Torabi, S. (2009). The economic lot scheduling problem in flow lines with sequence-dependent setups. *World Academy of Science Eng Tech*, 47, 2008.
- Hodgson, T. J. (1970). Addendum to Stankard and Gupta's note on lot size scheduling. *Management Science*, 16(7), 514-517.
- HODGSON, T. J., & NUTTLE, H. L. (1986). A note on linear programming and the single machine lot size scheduling problem. *THE INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 24(4), 939-943.
- Holmbom, M., Segerstedt, A., & van der Sluis, E. (2013). A solution procedure for Economic Lot Scheduling Problems even in high utilisation facilities. *International Journal of Production Research*, 51(12), 3765-3777.
- Hsu, W.-L. (1983). On the General Feasibility of Scheduling Lot Sizes of Several Products on One Machine. *Management Science*, 29(1), 93-105.
- Huang, J.-Y., & Yao, M.-J. (2006). An improved heuristic for solving the Economic Lot Scheduling Problem in flow shops under Power-of-Two Policy. *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 23(2), 127-140.
- Huang, J.-Y., & Yao, M.-J. (2007). A new algorithm for determining production schedules when solving the multi-product economic lot sizing problem in flow shops. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(5-6), 560-578.

- Huang, J.-Y., & Yao, M.-J. (2008). A genetic algorithm for solving the economic lot scheduling problem in flow shops. *International Journal of Production Research*, 46(14), 3737-3761.
- Jenabi, M., Fatemi Ghomi, S. M. T., Torabi, S. A., & Karimi, B. (2007). Two hybrid meta-heuristics for the finite horizon ELSP in flexible flow lines with unrelated parallel machines. *Applied Mathematics and Computation*, 186(1), 230-245.
- Jenabi, M., Ghomi, S. F., Torabi, S. A., & Karimi, B. (2007). Two hybrid meta-heuristics for the finite horizon ELSP in flexible flow lines with unrelated parallel machines. *Applied Mathematics and Computation*, 186(1), 230-245.
- Kai Chan, H., Ho Chung, S., & Lim, M. K. (2013). Recent research trend of economic-lot scheduling problems. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 24(3), 465-482.
- Kayvanfar, V., & Zandieh, M. (2012). The economic lot scheduling problem with deteriorating items and shortage: an imperialist competitive algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62(5-8), 759-773.
- Kayvanfar, V., Zandieh, M., & Mahdavi, I. (2011). *Economic lot scheduling problem with allowable shortage: A multi-objective approach*. Paper presented at the Industrial Engineering and Engineering Management (IE&EM), 2011 IEEE 18Th International Conference on.
- Khouja, M. (1997). The scheduling of economic lot sizes on volume flexible production systems. *International Journal of Production Economics*, 48(1), 73-86.
- Khouja, M., Michalewicz, Z., & Wilmot, M. (1998). The use of genetic algorithms to solve the economic lot size scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 110(3), 509-524.
- Khoury, B., Abboud, N., & Tannous, M. (2001). The common cycle approach to the ELSP problem with insufficient capacity. *International Journal of Production Economics*, 73(2), 189-199.

- Krone Jr, L. (1964). A note on economic lot sizes for multi-purpose equipment. *Management Science*, 10(3), 461-464.
- Kuo, H.-W., & Inman, R. R. (1990). A practical heuristic for the group technology economic lot scheduling problem. *The International Journal of Production Research*, 28(4), 709-722.
- Larraneta, J., & Onieva, L. (1988). The economic lot-scheduling problem: a simple approach. *Journal of the Operational Research Society*, 373-379.
- Lee, C.-Y., & Danusaputro, S. (1989). Economic lot scheduling for two-product problem. *IIE transactions*, 21(2), 162-169.
- Leung, S. Y. S., Wong, W. K., & Mok, P. Y. (2008). Multiple-objective genetic optimization of the spatial design for packing and distribution carton boxes. *Computers & Industrial Engineering*, 54(4), 889-902.
- Levén, E., & Segerstedt, A. (2007). A scheduling policy for adjusting economic lot quantities to a feasible solution. *European Journal of Operational Research*, 179(2), 414-423.
- Liu, J., Wu, L., & Zhou, Z. (2008). A time-varying lot size method for the economic lot scheduling problem with shelf life considerations. *European Journal of Industrial Engineering*, 2(3), 337-355.
- Luo, R. (2010). *New algorithm for economic lot scheduling problem*. Paper presented at the Logistics Systems and Intelligent Management, 2010 International Conference on.
- Luo, R. W., Xie, R. H., Xiao, L. W., & Zou, Y. F. (2014). *An Algorithm for Economic Lot Scheduling Problem*. Paper presented at the Advanced Materials Research.
- Madigan, J. (1968). Scheduling a multi-product single machine system for an infinite planning period. *Management Science*, 14(11), 713-719.
- Maxwell, W. L. (1964). The scheduling of economic lot sizes. *Naval Research Logistics Quarterly*, 11(2), 89-124.
- Mejía Argueta, C., Soto Cardona, O. C., Gámez Albán, H. M., & Moreno Moreno, J. P. (2015). Análisis del tamaño de empaque en la cadena de valor para

- minimizar costos logísticos: un caso de estudio en Colombia. *Estudios Gerenciales*, 31(134), 111-121.
- Mohammadi, M., Musa, S. N., & Bahreininejad, A. (2014). Optimization of mixed integer nonlinear economic lot scheduling problem with multiple setups and shelf life using metaheuristic algorithms. *Advances in Engineering Software*, 78, 41-51.
- Mohammadi, M., Musa, S. N., & Bahreininejad, A. (2015). Optimization of economic lot scheduling problem with backordering and shelf-life considerations using calibrated metaheuristic algorithms. *Applied Mathematics and Computation*, 251, 404-422.
- Mokhlesian, M., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Jolai, F. (2010). Economic lot scheduling problem with consideration of money time value. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 1(2), 121-138.
- Moon, D. H., & Christy, D. P. (1998). Determination of optimal production rates on a single facility with dependent mold lifespan. *International Journal of Production Economics*, 54(1), 29-40.
- Moon, I., Cha, B., & Bae, H. (2006). Hybrid genetic algorithm for group technology economic lot scheduling problem. *International journal of production research*, 44(21), 4551-4568.
- Moon, I., Giri, B., & Choi, K. (2002). Economic lot scheduling problem with imperfect production processes and setup times. *Journal of the Operational Research Society*, 53(6), 620-629.
- Moon, I., Hahm, J., & Lee, C. (1998). The effect of the stabilization period on the economic lot scheduling problem. *IIE transactions*, 30(11), 1009-1017.
- Moon, I., Silver, E. A., & Choi, S. (2002). Hybrid genetic algorithm for the economic lot-scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 40(4), 809-824.
- Narro Lopez, M. A., & Kingsman, B. G. (1991). The economic lot scheduling problem: theory and practice. *International Journal of Production Economics*, 23(1-3), 147-164.

- Oh, H.-C., & Karimi, I. (2001). Planning production on a single processor with sequence-dependent setups part 1: determination of campaigns. *Computers & Chemical Engineering*, 25(7), 1021-1030.
- Ouenniche, J., & Bertrand, J. (2001). The finite horizon economic lot sizing problem in job shops:: the multiple cycle approach. *International Journal of Production Economics*, 74(1), 49-61.
- Ouenniche, J., & Boctor, F. (1998). Sequencing, lot sizing and scheduling of several products in job shops: the common cycle approach. *International journal of production research*, 36(4), 1125-1140.
- Ouenniche, J., & Boctor, F. F. (2001a). The G-group heuristic to solve the multi-product, sequencing, lot sizing and scheduling problem in flow shops. *International journal of production research*, 39(1), 81-98.
- Ouenniche, J., & Boctor, F. F. (2001b). The multi-product, economic lot-sizing problem in flow shops: the powers-of-two heuristic. *Computers & Operations Research*, 28(12), 1165-1182.
- Ouenniche, J., & Boctor, F. F. (2001). The two-group heuristic to solve the multi-product, economic lot sizing and scheduling problem in flow shops. *European Journal of Operational Research*, 129(3), 539-554.
- Park, K. S., & Yun, D. K. (1984). A stepwise partial enumeration algorithm for the economic lot scheduling problem. *IIE transactions*, 16(4), 363-370.
- Peixin, Z. (2012). An Improved Particle Swarm Optimization Algorithm for the Economic Lot Scheduling Problem under Power-of-Two Policy. *Advances in Information Sciences & Service Sciences*, 4(20).
- Peixin, Z., & Guijie, Q. (2008). *A Partheno-genetic Algorithm for the Economic Lot Scheduling Problem under Power-of-Two Policy*. Paper presented at the Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, 2008. ICIII'08. International Conference on.
- Pesenti, R., & Ukovich, W. (2003a). Economic lot scheduling on multiple production lines with resource constraints. *International Journal of Production Economics*, 81-82, 469-481.

- Pesenti, R., & Ukovich, W. (2003b). Economic lot scheduling on multiple production lines with resource constraints. *International Journal of Production Economics*, 81, 469-481.
- Philipoom, P. R., Rees, L. P., & Taylor, B. W. (1989). Solving the Economic Lot-Scheduling Problem Using the Method of Prime Subperiods. *Decision Sciences*, 20(4), 794-809.
- Programa de Transformación Productiva. (2013). Plan de Negocio para el sector siderúrgico, metalmecánico y astillero en Colombia. Retrieved from www.ptp.com.co
- Qiu, X., & Chang, H.-Y. (2009). *A hybrid genetic algorithm for solving the economic lot scheduling problem (ELSP)*. Paper presented at the Machine Learning and Cybernetics, 2009 International Conference on.
- Radhakrishnan, S., & Ventura, J. A. (2000). Simulated annealing for parallel machine scheduling with earliness-tardiness penalties and sequence-dependent set-up times. *International Journal of Production Research*, 38(10), 2233-2252.
- Rao, V. D. P., Subbaiah, K. V., & Raju, V. R. (2009). Fuzzy genetic approach to economic lot-size scheduling problem. *JJMIE*, 3(1).
- Raza, S. A., & Akgunduz, A. (2005). The use of meta-heuristics to solve economic lot scheduling problem *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization* (pp. 190-201): Springer.
- Raza, S. A., Akgunduz, A., & Chen, M. (2006). A tabu search algorithm for solving economic lot scheduling problem. *Journal of Heuristics*, 12(6), 413-426.
- Rogers, J. (1958). A computational approach to the economic lot scheduling problem. *Management Science*, 4(3), 264-291.
- Saghir, M. (2004). The concept of Packaging Logistics. *Proceedings of the Fifteenth Annual POMS Conference*.
- Salvietti, L., & Smith, N. R. (2008). A profit-maximizing economic lot scheduling problem with price optimization. *European Journal of Operational Research*, 184(3), 900-914.

- Santander-Mercado, A., & Jubiz-Diaz, M. (2016). The economic lot scheduling problem: a survey. *International Journal of Production Research*, 1-20.
- Sarker, R., & Newton, C. (2002). A genetic algorithm for solving economic lot size scheduling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 42(2), 189-198.
- Segerstedt, A. (1999). Lot sizes in a capacity constrained facility with available initial inventories. *International Journal of Production Economics*, 59(1), 469-475.
- Shirodkar, V. A., Sridharan, R., & Pillai, V. M. (2011). Effective allocation of idle time in the group technology economic lot scheduling problem. *International Journal of Production Research*, 49(24), 7493-7513.
- Soman, C., Donk, D. v., & Gaalman, G. (2004). A basic period approach to the economic lot scheduling problem with shelf life considerations. *International Journal of Production Research*, 42(8), 1677-1689.
- Stankard, M. F., & Gupta, S. K. (1969). A note on Bomberger's approach to lot size scheduling: heuristic proposed. *Management Science*, 449-452.
- Sternbeck, M. G. (2014). A store-oriented approach to determine order packaging quantities in grocery retailing. *Journal of Business Economics*, 1-28.
- Sun, H., Huang, H.-C., & Jaruphongsa, W. (2009a). A genetic algorithm for the economic lot scheduling problem under the extended basic period and power-of-two policy. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(1), 29-34.
- Sun, H., Huang, H.-C., & Jaruphongsa, W. (2009b). Genetic algorithms for the multiple-machine economic lot scheduling problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(11-12), 1251-1260.
- Sun, H., Huang, H.-C., & Jaruphongsa, W. (2009c). Genetic algorithms for the multiple-machine economic lot scheduling problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43(11), 1251-1260.
- Sun, H., Huang, H.-C., & Jaruphongsa, W. (2010). The economic lot scheduling problem under extended basic period and power-of-two policy. *Optimization Letters*, 4(2), 157-172.

- Tang, O., & Teunter, R. (2006). Economic lot scheduling problem with returns. *Production and Operations Management*, 15(4), 488-497.
- Tasgetiren, M. F., Bulut, O., & Fadiloglu, M. M. (2011, 11-15 April 2011). A *Differential Evolution algorithm for the economic lot scheduling problem*. Paper presented at the Differential Evolution (SDE), 2011 IEEE Symposium on.
- Tasgetiren, M. F., Bulut, O., & Fadiloglu, M. M. (2011). A *discrete artificial bee colony algorithm for the economic lot scheduling problem*. Paper presented at the Evolutionary Computation (CEC), 2011 IEEE Congress on.
- Tasgetiren, M. F., Bulut, O., & Fadiloglu, M. M. (2012). A *discrete harmony search algorithm for the economic lot scheduling problem with power of two policy*. Paper presented at the Evolutionary Computation (CEC), 2012 IEEE Congress on.
- Teunter, R., Kaparis, K., & Tang, O. (2008). Multi-product economic lot scheduling problem with separate production lines for manufacturing and remanufacturing. *European Journal of Operational Research*, 191(3), 1241-1253.
- Teunter, R., Tang, O., & Kaparis, K. (2009). Heuristics for the economic lot scheduling problem with returns. *International Journal of Production Economics*, 118(1), 323-330.
- Torabi, S., Fatemi, G. S., & Karimi, B. (2005). The finite horizon economic lot scheduling in flexible flow lines.
- Torabi, S., Karimi, B., & Ghomi, S. F. (2005). The common cycle economic lot scheduling in flexible job shops: The finite horizon case. *International Journal of Production Economics*, 97(1), 52-65.
- Torabi, S. A., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Karimi, B. (2005). The Finite Horizon Economic Lot Scheduling in Flexible Flowlines. *International Journal of Engineering*, 18(3), 273-284.
- Tápler, C., & Csík, Á. G. T. (2010). Packaging Unit Quantity Optimization. *Acta Technica Jaurinensis Series Logistica*, 3(3), 257-266.

- Vidal-Carreras, P. I., Garcia-Sabater, J. P., & Coronado-Hernandez, J. R. (2012). Economic lot scheduling with deliberated and controlled coproduction. *European Journal of Operational Research*, 219(2), 396-404.
- Wagner, B. J., & Davis, D. J. (2002). A search heuristic for the sequence-dependent economic lot scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 141(1), 133-146.
- Wagner, H. M. (2002). And Then There Were None. *Operations Research*, 50(1), 217-226.
- Wang, P. (2010). *Pack optimization problem: Models and solution methods*. Raleigh: North Carolina State University.
- Wen, N., Graves, S. C., & Ren, Z. J. (2012). Ship-pack optimization in a two-echelon distribution system. *European Journal of Operational Research*, 220(3), 777-785.
- Yao, M.-J. (2001). The peak load minimization problem in cyclic production. *Computers & Operations Research*, 28(14), 1441-1460.
- Yao, M.-J. (2005). The economic lot scheduling problem without capacity constraints. *Annals of Operations Research*, 133(1-4), 193-205.
- Yao, M.-J., & Elmaghraby, S. (2001). The economic lot scheduling problem under power-of-two policy. *Computers & Mathematics with Applications*, 41(10), 1379-1393.
- Yao, M.-J., & Huang, J.-X. (2005). Solving the economic lot scheduling problem with deteriorating items using genetic algorithms. *Journal of Food Engineering*, 70(3), 309-322.
- Yesodha, R., & Amudha, T. (2012). A comparative study on heuristic procedures to solve bin packing problems. *International Journal in Foundations of Computer Science & Technology*, 2(6), 37-49.
- Zailani, S., Jeyaraman, K., Vengadasan, G., & Premkumar, R. (2012). Sustainable supply chain management (SSCM) in Malaysia: A survey. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 330-340.

- Zanoni, S., Segerstedt, A., Tang, O., & Mazzoldi, L. (2012). Multi-product economic lot scheduling problem with manufacturing and remanufacturing using a basic period policy. *Computers & Industrial Engineering*, 62(4), 1025-1033.